L'ALUMINIUM DANS L'INDUSTRIE

DU MÊME AUTEUR

(A LA MÊME LIBRAIRIE)

Les Industries électrochimiques. — Fabrication électrochimique des métalloïdes et de leurs composés. — Chlore, alcalis et composés du chlore. — Ozone — Métaux alcalins et alcalino-terreux, métaux usuels, cuivre et nickel, métaux rares ou destinés à des usages spéciaux. — Composés organiques. — In-8° de 800 pages et 332 figures.................................... ..... **25 fr.**

Le Carbone et son industrie. — Propriétés générales des carbones. — Diamant : gisements, applications. — Mode de formation dans la nature et essais de reproduction. — Graphite et charbons électriques. — Carbones amorphes : charbon de bois, noirs industriels, coke, charbon de cornue. — La houille et ses différentes variétés. — Tourbe : utilisation industrielle. — Lignite — In-8° de 760 pages, 129 figures et une planche hors texte.................... **25 fr.**

La fabrication électrochimique de l'acide nitrique et des composés nitrés à l'aide des éléments de l'air. — Importance industrielle et économique des matières azotées. — Considérations sur le rôle économique de l'electricité dans la préparation électrochimique de l'acide nitrique. — Description des procédés actuels utilisés dans cette fabrication. — Applications des nitrates électrochimiques. — Cyanamide calcique. — Nitrières à haut rendement. — In-8° de 115 pages et 52 figures (2° *édition*)...... .... **4 fr. 50**

Les Métaux spéciaux et leurs composés métallurgiques industriels. — Manganèse, chrome, silicium, tungstène, molybdène, vanadium. — Production industrielle et électrométallurgique, utilisation. — Alliages de ces métaux avec les métaux usuels, rares et spéciaux. — In-8° de 600 pages et 200 figures.. **18 fr.**

Les Pierres précieuses. — Propriétés caractéristiques et procédés de détermination. — Description des gemmes alumineuses, silicatées, etc. — Etat naturel, exploitation. — Production artificielle. — Utilisation. — Lois et règlements. — Bibliographie. — In-4° de 500 pages, 300 figures et 24 planches hors texte dont 8 en couleurs.. .... **30 fr.**

Les Fours électriques de laboratoire. — Analyses et incinerations. — Fusions et volatilisations. — Essais et recherches chimiques, métallurgiques et céramiques. — Trempe et traitements divers des métaux et alliages. — In-8° de 80 pages avec 60 figures.. .... **4 fr. 50**

Les Industries du Four électrique. — Fours électriques industriels : classification, emplois généraux. — Fours de fusion et de réduction. — Électrodes. — Préparation des métaux au four électrique. — Électrosidérurgie. — Aciers spéciaux. — Ferro-alliages. — Zinc. — Aluminium. — Alliages électrothermiques. — Carbures, siliciures, carborundum. — Acide nitrique et dérivés nitrés. — Produits spéciaux du four électrique : abrasifs, verre et quartz fondus, produits chimiques et métallurgiques divers, produits réfractaires, graphite, etc. — Travail électrothermique des métaux et alliages. — In-8° de 550 pages avec 300 figures. (*En préparation.*)

Majoration temporaire de 20 p. 0/0 sur les prix ci-dessus.

JEAN ESCARD
INGÉNIEUR CIVIL
LAURÉAT DE L'INSTITUT ET DE LA SOCIÉTÉ D'ENCOURAGEMENT
POUR L'INDUSTRIE NATIONALE

L'ALUMINIUM

DANS

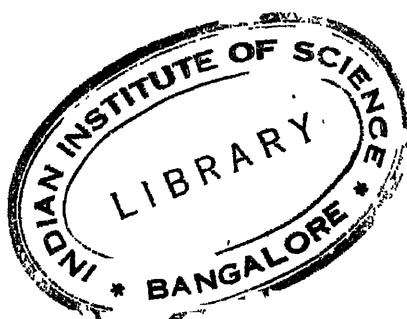
L'INDUSTRIE

MÉTAL PUR

ALLIAGES D'ALUMINIUM

PARIS (VI[e])
H. DUNOD ET E. PINAT, ÉDITEURS
47 et 49, Quai des Grands-Augustins

1918


INDIAN INSTITUTE OF SCIENCE
LIBRARY
* BANGALORE *

INTRODUCTION

L'industrie de l'aluminium intéresse à la fois les métallurgistes, les chimistes, les constructeurs et les mécaniciens. Pur ou à l'état d'alliage, il présente des qualités qui, réunies, n'appartiennent à aucun autre métal; ces qualités seront étudiées dans ce livre avec détails, de même que les applications, très nombreuses et très diverses, dont il est susceptible. Sa préparation s'effectue actuellement par un procédé relativement simple et il n'est pas douteux que les emplois du métal pur se généraliseront encore davantage lorsque les minerais d'aluminium susceptibles de traitement se seront multipliés.

L'aluminium est, en effet, l'un des éléments les plus répandus de l'écorce terrestre : il entre dans la composition d'un grand nombre de roches, à côté du silicium et du calcium, et l'argile elle-même n'est autre chose qu'un silicate d'aluminium. Malheureusement, l'extraction de l'alumine de ces diverses substances en vue de l'isolement du métal est une opération complexe en raison de leur stabilité; elle constitue actuellement la principale difficulté d'application des méthodes proposées ou essayées. Il n'est pas douteux cependant que, dans un avenir plus ou moins prochain, ces difficultés seront aplanies et que l'aluminium sera, par son faible prix de revient, un des concurrents les plus sérieux des métaux usuels.

Cependant l'aluminium pur ne peut se prêter à tous les usages en raison de certaines imperfections mécaniques; aussi a-t-on cherché à suppléer à ces dernières en l'additionnant de quantités plus ou moins importantes d'autres métaux, tels que le cuivre, le nickel, le magnésium, le tungstène, etc., qui améliorent ses qualités. Le but poursuivi actuellement par tous les métallurgistes est d'obtenir un alliage aussi résistant que l'acier et aussi léger que l'aluminium pur : il doit se laisser travailler, donner des pièces coulées parfaitement nettes, pouvoir être aisément forgé, laminé, embouti, comprimé sans difficulté tout en conservant les qualités de résistance et d'élasticité nécessaires. Tel est le problème à résoudre. C'est un tel alliage qui est appelé à prendre place désormais dans la construction mécanique générale. Bien que cet alliage ne soit pas encore trouvé, les efforts tentés ont tracé aux techniciens la voie à suivre pour aboutir au succès; certains alliages d'aluminium semblent du reste presque réaliser les desideratus formulés par les industriels.

A ces divers titres, l'aluminium intéresse la France au plus haut point. Non seulement, en effet, c'est notre pays qui en est le producteur le plus important d'Europe, mais c'est aussi sur notre sol que se trouvent les gisements de bauxite (principal minerai d'aluminium) les plus nombreux et les plus riches. Ajoutons que c'est à un Français, Sainte-Claire Deville, que revient d'avoir préparé et étudié pour la première fois ce métal (1854). *C'est également à un Français, Héroult, que l'on doit les méthodes véritablement industrielles et pratiques qui ont vulgarisé la fabrication de l'aluminium et développé ses applications.*

Le lecteur se rendra compte, à la lecture de cet ouvrage, combien l'industrie de l'aluminium a pris d'extension depuis

vingt-cinq ans, époque à laquelle les ingénieurs le regardaient simplement comme un zinc de mauvaise qualité. Il jugera de la multiplicité des efforts tentés et des résultats obtenus tant pour réaliser la production du métal pur *que pour la production facile et économique des* alliages légers. *Ces derniers, par leurs caractères différents de constitution micrographique, d'homogénéité, de légèreté, de propriétés mécaniques et physiques, de résistance chimique, se prêtent à des usages différents et variés. On peut dès à présent prévoir le moment où l'alliage léger idéal, réunissant les qualités énumérées précédemment, fera aussi son apparition dans l'industrie. Ce jour-là, l'aluminium remplacera économiquement sur le marché les métaux en alliages d'application courante tels que le fer, le cuivre, le zinc, les laitons et les bronzes.*

JEAN ESCARD.

L'ALUMINIUM DANS L'INDUSTRIE

CHAPITRE PREMIER

PROCÉDÉS DE FABRICATION

Dans la description du procédé courant de fabrication de l'aluminium, nous passerons sous silence les nombreux essais tentés par les savants et les industriels qui, dans ces cinquante dernières années, se sont occupés de la question. Il serait injuste cependant de ne pas rappeler les noms et les travaux de Sainte-Claire Deville (1854-1857), Cowles (1886-1892) et Minet (1887-1889). Ce dernier a été appelé à juste titre le « père de l'aluminium », bien que son procédé, très étudié, n'ait pas eu les résultats espérés et n'ait pu fonctionner industriellement. Le procédé actuellement utilisé dans la plupart des usines de production est celui d'Héroult, qui date de 1886 et qui, sous une forme très peu modifiée, est encore presque universellement appliqué industriellement aujourd'hui.

Principe du procédé industriel. — Le procédé consiste dans l'électrolyse de l'alumine Al^2O^3 dissoute dans un bain de cryolithe en fusion. Cette électrolyse s'effectue dans un four électrique revêtu intérieurement de charbon communiquant avec le pôle négatif d'une source d'énergie électrique extérieure; des électrodes de charbon, mobiles verticalement, plongent dans le mélange liquide et communiquent avec le pôle positif de la source d'énergie électrique. La chaleur nécessaire pour fondre et maintenir en fusion les substances introduites dans le four est fournie par le courant lui-même sans chauffage extérieur. La quantité d'énergie néces-

saire à cette double opération étant très importante, c'est seulement par l'emploi des chutes d'eau qu'on peut arriver à un rendement économique intéressant. Aussi la plupart des usines à aluminium sont-elles installées dans les pays de montagnes où la force motrice revient ainsi à meilleur compte.

La formation d'aluminium a son origine, d'après la plupart des techniciens, dans l'alumine ; il prend naissance aux dépens de celle-ci par scission de la molécule. L'aluminium, mis en liberté à l'électrode négative, se rassemble au fond de la cuve, tandis que l'oxygène, libéré à l'électrode positive, brûle le carbone de cette dernière et forme de l'oxyde de carbone ; ce gaz se consume aussitôt au contact de l'air, de sorte que sa transformation en acide carbonique est complète. On aurait la réaction suivante :



$$2Al^2O^3 + 3C = 4Al + 3CO^2.$$

Cependant, en pratique, la réaction est un peu plus complexe et elle est en rapport avec le pourcentage des matières introduites dans le four. C'est ainsi que lorsque la teneur du bain en alumine descend au-dessous d'un certain chiffre, la cryolithe (fluorure double d'aluminium et de sodium, $F^6Al^2 + 6FNa$) s'électrolyse à son tour partiellement : à l'anode, on observe alors un dégagement de gaz fluorés et, à la cathode, il peut se déposer du sodium dont la présence nuit beaucoup, comme on le sait, aux propriétés de l'aluminium.

Pour supprimer toute action secondaire, on doit donc veiller à la constance de la composition du bain. On compense les pertes en ajoutant, à intervalles de temps suffisamment rapprochés, de l'alumine et, au besoin, de la cryolithe. En outre, la pratique a montré que l'emploi de certains fondants (fluorure de calcium, fluorure d'aluminium, chlorure de sodium) était essentiel. Ce sont ces fondants, dont la nature et la proportion varient suivant les usines, qui différencient surtout les modes d'obtention de l'aluminium des diverses sociétés s'occupant de cette industrie.

L'opération comprend deux phases principales : le *traitement du minerai*, pour l'extraction de l'alumine qu'il est nécessaire d'obtenir dans le plus parfait état de pureté possible, et la *préparation de l'aluminium*. Le minerai universellement employé est la bauxite, qu'on traite généralement dans des usines spéciales situées souvent

au voisinage même des gisements, mais souvent aussi à plusieurs centaines de kilomètres des usines métallurgiques où s'effectue l'extraction du métal. Cette distance est, comme nous l'avons vu, imposée par l'absence des forces naturelles à proximité des mines de bauxite actuellement connues et exploitées.

I. — Matières premières.

Les matières premières essentielles à la production de l'aluminium dans le four électrique sont : la *bauxite*, d'où est extraite l'*alumine*, la *cryolithe* et les divers *fondants* employés au cours de l'opération, enfin les *électrodes de charbon* dont l'usure est relativement élevée.

Bauxite. — La *bauxite* est un hydrate d'alumine impur correspondant à la formule $(Al, Fe)^2H^4O^5$ et qu'on rencontre surtout, en France, dans les départements du Var, des Bouches-du-Rhône, de l'Hérault, de l'Ariège et du Gard. Il en existe aussi des gisements plus ou moins importants dans la Géorgie et l'Arkansas. Elle renferme environ 60 % d'alumine Al^2O^3, bien qu'elle en contienne parfois jusqu'à 80 %, de 2 à 10 % de silice SiO^2, de 10 à 25 % de sesquioxyde de fer Fe^2O^3, plus de 10 à 15 % d'eau et de 1 à 2 % d'acide titanique.

Les bauxites se subdivisent en *bauxites blanches*, où l'impureté prédominante est la silice, et en *bauxites rouges* qui contiennent une assez forte proportion de sesquioxyde de fer. Cette distinction n'a cependant rien d'absolu, car on connaît des bauxites blanches qui sont à la fois pauvres en oxyde de fer et en silice ; c'est le cas de certains minerais américains qui se rapprochent, d'ailleurs, plus de la gibbsite que de la bauxite.

Les bauxites blanches sont difficiles à purifier ; aussi utilise-t-on généralement les bauxites rouges, malgré leur pourcentage élevé de Fe^2O^3. Dans cette fabrication, on admet couramment jusqu'à 16 à 17 % de sesquioxyde de fer ; quelques usines traitent même des bauxites à 25 % de ce composé. La teneur en alumine ne doit pas s'abaisser au-dessous de 57 % ni celle en silice être

supérieure à 3 °/₀. Pour arriver aux proportions voulues cède par mélange de minerais riches et de minerais in différences en plus ou en moins donnent lieu à des prime pénalités dont le taux varie entre 0 fr. 20 et 0 fr. 40 par u

Nous donnons ci-dessous l'analyse d'un échantillon d provenant du Comté de Wilkinson, en Géorgie :

Silice	9,38
Alumine	57,58
Sesquioxyde de fer	0,96
Acide titanique	2,76
Eau	29,47

Dosage de l'alumine dans la bauxite. — Parmi les d méthodes de dosage de l'alumine dans la bauxite, nous rons la suivante dont la précision est des plus satisfaisant présente surtout l'avantage de fournir des résultats dant toujours entre eux jusqu'à la quatrième décimale. comme suit :

Dans un creuset de nickel ouvert, on fond 1 demi-gr bauxite finement pulvérisée avec un excès de peroxyde d et un peu de soude caustique. On remue de temps en mélange pendant la fusion. Après refroidissement, on d masse obtenue dans un peu d'eau, on dilue jusqu'à avoir u d'environ 500 centimètres cubes, on laisse déposer et on recueillant le liquide clair dans un ballon d'un litre.

Le filtre est calciné avec le produit qu'il a retenu ; sa ce pulvérisée soigneusement dans un creuset d'agate, puis e due, comme précédemment, avec du peroxyde de sodium soude. Le nouveau magmat ainsi obtenu est dissous dans timètres cubes d'eau et cette solution est, sans filtration p additionnée au premier filtrat. On amène à la températu naire le mélange des deux liquides, on complète à un lit prélève une partie aliquote, soit, par exemple, 100 cen cubes.

Ces 100 centimètres cubes sont d'abord additionnés d'u d'acide chlorhydrique, puis, comme à l'ordinaire, on re neutralité en ajoutant avec précaution de l'ammoniaque

de fer. Lorsqu'on a atteint une réaction faiblement alcaline, on fait bouillir et on filtre à la trompe. On recueille ainsi un précipité d'alumine impure contenant encore de l'alcali et du chlore, on le lave une fois avec une solution de nitrate d'ammonium très faiblement alcalin, puis on le fait tomber avec un jet de pissette dans le vase où doit se faire sa précipitation définitive.

Il y est d'abord redissous dans un excès d'acide nitrique, puis on précipite l'alumine par l'ammoniaque, on fait bouillir et on filtre en se servant du même filtre que précédemment. On lave le précipité deux à trois fois avec la solution faiblement alcaline déjà employée et on le calcine humide dans un creuset en platine, comme à l'ordinaire.

Avant de pousser la calcination à fond, on humecte le précipité avec 2 centimètres cubes d'acide fluorhydrique et quinze gouttes d'acide sulfurique concentré. On chasse ces deux acides au bain de sable, puis on calcine aussi haut que possible pour obtenir une alumine anhydre et exempte de toute trace d'acide sulfurique. On termine en pesant le creuset, dont on a fait au début la tare.

La durée du dosage est de 4 à 5 heures.

En faisant avec la même prise d'essai de 1 demi-gramme quatre déterminations parallèles, on a obtenu les résultats suivants pour les quatre portions de 0gr,125 chacune de bauxite analysée :

Première portion	0gr,07060	Al^2O^3
Deuxième —	0 ,07048	—
Troisième —	0 ,07040	—
Quatrième —	0 ,07050	—

Nous avons dit que cette analyse comporte une fusion alcaline lans un creuset en nickel. Les creusets en nickel que l'on trouve 'ans le commerce renferment souvent des proportions assez conidérables d'impuretés, en particulier du soufre, du cuivre, du hrome. De plus, la plupart sont à parois trop minces et ne euvent servir que quatre à cinq fois. Pour les laboratoires indus'iels qui désireraient faire usage de cette méthode d'analyse, il onviendrait de faire fabriquer spécialement des creusets en ickel pur, ayant des parois épaisses d'environ 2 millimètres, auts de 35 millimètres et ayant 40 millimètres de diamètre. De ls creusets peuvent supporter de 20 à 30 fusions, après quoi ils

se fendillent et sont hors de service. Leur prix de revient est à peu près de 2 francs la pièce et, après emploi, ils possèdent encore une valeur marchande dont on peut tirer parti.

Alumine. — La purification de la bauxite en vue d'obtenir l'alumine pure est une opération importante et délicate, d'autant plus que l'alumine possède des propriétés chimiques assez particulières : c'est un oxyde indifférent s'unissant aussi bien aux acides pour former des sels d'aluminium qu'aux bases fortes pour donner naissance à des aluminates. Elle est insoluble dans l'eau, soit hydratée, soit anhydre. Elle fond à la température du four électrique et se transforme alors en une masse très dure, sorte de corindon artificiel, presque inattaquable par les bases et les acides usuels.

Il existe différents procédés de traitement de la bauxite par voie sèche ou par voie humide. Dans le *procédé Deville*, le minerai est attaqué au rouge par du carbonate de soude dans un four à réverbère, fixe ou tournant. Dans cette opération, de l'acide carbonique est mis en liberté, tandis que la soude se combine à l'aluminium pour former de l'aluminate de soude. Après filtration et lavage, on obtient un précipité formé des impuretés (silice, acide titanique, sesquioxyde de fer). La solution clarifiée est finalement soumise à l'action d'un courant de gaz carbonique qui en précipite de l'alumine très dense. Comme une petite quantité de silice se combine à la soude et forme du silicate de soude qui passe en solution avec l'aluminate de soude, on élimine la silice en chauffant pendant un temps suffisant la solution dans un autoclave à cinq ou six atmosphères : la silice se dépose alors peu à peu à l'état de silico-aluminate de soude. La solution, filtrée une dernière fois, donne facilement de l'alumine pure par précipitation.

Le procédé Deville, malgré les perfectionnements qu'on a cherché à lui apporter, n'est presque plus utilisé aujourd'hui, et les installations récentes d'extraction de l'alumine par son application n'ont pas conduit aux résultats espérés.

Dans le *procédé Peniakoff*, exploité actuellement par plusieurs usines, on prépare de l'aluminate de soude à partir de la bauxite et du chlorure de sodium. On réduit, soit par le charbon, soit par le sulfure de fer, un mélange de bauxite et de sulfate de soude ; la

réaction s'opère à 1.200° dans un four tournant. Dans les deux cas, il se dégage du gaz sulfureux qui, mélangé au sortir du four avec de l'air et de la vapeur d'eau, puis dirigé sur du chlorure de sodium, transforme celui-ci en sulfate de soude avec formation d'acide chlorhydrique : ce dernier est conservé à part pour être livré au commerce, tandis que le sulfate sert à purifier de nouvelles quantités de bauxite.

Le produit extrait du four est lessivé pour extraire l'aluminate de soude et la solution filtrée est traitée comme dans le procédé Deville.

Dans le *procédé Bayer*, qui est celui le plus universellement employé pour l'obtention de l'alumine pure, on a recours à la voie humide. La bauxite, grillée à 700° après concassage, est soumise à l'action d'une solution de soude (densité : 1,40 à 1,45) dans un autoclave chauffé à la vapeur et muni d'un agitateur. Au sortir de l'appareil, la solution est étendue à 1,25 de densité, clarifiée et filtrée au filtre-presse : l'alumine peut alors en être extraite par précipitation. C'est sous l'influence d'un excès d'eau, en présence d'alumine libre, que se fait la décomposition de l'aluminate de soude. Sous une influence de masse, l'alumine libre facilite l'hydrolyse de l'aluminate, ce qui différencie nettement cette méthode des précédentes.

Le *procédé Vergé* est une variante du procédé Bayer. La bauxite, simplement concassée, est mélangée à la solution de soude caustique dans un autoclave. Le broyage et la calcination sont évités par l'emploi d'un jet de vapeur à cinq atmosphères qui pénètre dans l'autoclave et produit à la fois le chauffage nécessaire à l'attaque chimique et la désagrégation mécanique des grains de bauxite. La solubilisation de la silice serait encore plus faible que dans les méthodes précédentes. L'attaque par une lessive alcaline à haute pression n'est cependant pas exempte d'inconvénients.

Quel que soit le procédé employé, l'alumine, pour être complètement anhydre, doit être calcinée. La calcination s'effectue à 900° dans des fours de construction différente ; elle entraîne toujours une dépense importante de combustible et des pertes assez grandes d'alumine. Finalement, le rendement moyen est d'une tonne d'alumine pour deux de bauxite. On perd, au cours des diverses opérations, de 4 à 6 % de l'alumine contenue dans le minerai. Aussi n'est-il pas surprenant qu'on ait cherché de divers côtés à simplifier

le mode d'obtention de l'alumine pure qui est en outre une opér tion longue, nécessitant beaucoup de soins et des frais élevés (main-d'œuvre. L'emploi des argiles semble devoir fournir dans ı avenir plus ou moins prochain la solution économique de la que tion. Il en sera question plus loin (V. p. 22). Disons de suite qı dans les argiles, la proportion d'alumine est de 40 à 45 $^0/_0$ env ron; les impuretés (silice et oxyde de fer) y sont en plus granc proportion que dans la bauxite en raison de la prédominance (l'alumine dans cette dernière. Le traitement des argiles en vue (la production simultanée d'un alliage et d'alumine semble intére sant, de même que le procédé de Cowles-Kayser, qui permet d'aı river à un silicate d'où l'alumine est extraite par réaction à l'aide d la chaux vive.

Hall a fixé le principe de la *fabrication directe de l'alumine partir de la bauxite* au four électrique par voie d'affinage réduc teur de cette dernière. Si l'on ajoute à la bauxite une quantité su fisante de charbon et si l'on conduit le four de façon convenablc toutes les impuretés du minéral finissent par être éliminées l'état de ferro-alliage. On obtient de la sorte de l'alumine auss pure que celle préparée par les méthodes chimiques précédentc et pouvant servir à la fabrication de l'aluminium. Cependant l pourcentage de charbon nécessaire à cette réduction entraîne l formation de carbure d'aluminium; aussi l'alumine électrother mique, exposée à l'humidité de l'air, se délite et tombe en pous sière, par suite de la décomposition spontanée du carbure d'alumi nium. Cependant, depuis la patente anglaise de Hall, d'autre brevets ont été pris; des essais industriels fort intéressants on été faits dans divers pays et la technique du procédé peut êtr considérée comme établie.

Néanmoins, ce mode de purification de la bauxite n'est pa encore appliqué industriellement. Sa supériorité économique su les procédés chimiques est en effet douteuse, d'autant plus que le alliages obtenus comme sous-produits se conservent mal. Enfin l'alumine électrothermique employée pour la préparation de l'aluminium, aurait le grave inconvénient d'encrasser le fond des cuves, soit que le grain d'alumine fondue se dissolve plus difficilement dans le bain de cryolithe que le grain d'alumine calcinée, soit que le carbure

d'aluminium qu'elle renferme s'accumule rapidement sur la sole.

Il faut enfin signaler le *procédé aux azotures*. En soumettant la bauxite à l'action du four électrique (1800° à 1900°) en présence d'azote, on obtient de l'azoture d'aluminium. Celui-ci, décomposé en autoclave en présence de lessive de soude, donne d'une part de l'ammoniaque (qui peut servir aisément à la production du sulfate utilisé en agriculture) et, d'autre part, de l'aluminate de soude d'où il est facile d'extraire comme précédemment de l'alumine pure. Il y a dans l'industrialisation de l'azoture d'aluminium un point qui aura certainement une répercussion importante sur la fabrication de l'aluminium. Plusieurs usines sont du reste sur le point de s'installer ou de fonctionner d'après l'application de cette méthode. Dans le *procédé Serpek* on emploie un four électrique rotatif dans lequel un mélange de bauxite et de charbon est chauffé dans un courant d'azote. On obtient ainsi de l'azoture d'aluminium à 17-22 % d'azote ; les impuretés de la bauxite sont partiellement volatilisées, comme le silicium, ou bien passent à l'état d'alliage complexe disséminé dans la masse. Cet azoture d'aluminium impur est substitué, comme matière première, à la bauxite dans les ateliers de fabrication de l'alumine travaillant par la méthode Bayer. La valeur marchande du sulfate d'ammoniac vient ainsi en déduction importante du prix de revient de l'alumine, et comme le prix de revient de l'aluminium est en relation étroite avec celui de l'alumine, l'application de cette méthode de production de cette dernière se trouve avoir une importance capitale pour les fabricants d'aluminium.

Cryolithe et fondants. — La cryolithe joue, dans la fabrication de l'aluminium, le rôle de dissolvant de l'alumine. C'est, comme nous l'avons vu, un fluorure double d'aluminium et de sodium de formule $F^6Al^2 + 6FNa$ dont le seul gisement important se trouve à Ivigtut (Groenland). Nous donnons ci-dessous l'analyse d'une cryolithe ayant cette origine :

Fluor	51,58 %
Alumine	12,81
Sodium	28,62
Silice	0,20

Elle renferme en général 80 % de cryolithe pure et 20 % de matières étrangères mélangées (sidérose, quartz, pyrites, calcite, fluorine). Comme elle doit, pour la préparation de l'aluminium, être aussi pure que possible, on la soumet avant son utilisation à un traitement minutieux consistant en des triages, broyages, tamisages et séparations électro-magnétiques. On la pulvérise ensuite finement et elle peut ainsi être employée de suite à la fabrication de l'aluminium.

Cependant, le prix élevé de la cryolithe naturelle a suscité des recherches en vue de sa production par voie chimique et, en fait, on arrive aujourd'hui couramment à préparer de la *cryolithe synthétique :* elle ne contient pas de silice, mais renferme souvent d'autres matières étrangères et en particulier du sulfate de chaux. La majeure partie de la cyolithe utilisée dans les usines d'aluminium est ainsi obtenue : elle titre de 90 à 92 % de fluorure double. Les différents procédés qui permettent de la préparer partent tous de la fluorine, minéral très répandu et constitué par du fluorure de calcium.

Dans le *procédé Grabau,* cette fluorine est chauffée avec une solution de sulfate d'alumine. On obtient du sulfate de chaux et une solution de fluosulfate d'aluminium. D'autre part, on prépare du fluorure de sodium en décomposant la fluorine par l'acide sulfurique : celui-ci, neutralisé par du carbonate de soude, donne du fluorure de sodium. Les deux produits obtenus séparément, fluosulfate d'aluminium et fluorure de sodium, réagissant l'un sur l'autre, donnent alors la réaction :



$$F^4SO^4Al^2 + 8FNa = F^6Al^2,6FNa + SO^4Na^2.$$

En lavant le produit ainsi préparé, le sulfate de sodium, soluble, est éliminé et il reste de la cryolithe insoluble.

Dans le *procédé Netto,* on fond du fluorure de sodium avec du sulfate d'alumine déshydraté. On a la réaction suivante :



$$(SO^4)^3Al^2 + 12FNa = F^6Al^2,6FNa + 3SO^4Na^2.$$

La cryolithe est débarrassée comme précédemment, par lessivage, du sulfate de sodium soluble.

Le *procédé Lösekann* prépare d'abord du fluorure de potassium

en chauffant la fluorine avec du sulfate de potassium et du charbon. La solution obtenue est mélangée à du sulfate de sodium et, par double décomposition, on obtient du fluorure de sodium et du sulfate de potassium. Celui-ci rentre dans la première phase de la fabrication, tandis que le fluorure de sodium, traité par du sulfate d'alumine comme dans le procédé Netto, fournit la cryolithe. D'après Lösekann, la formation de cette dernière pourrait même être réalisée directement à partir du fluorure de potassium, d'après la formule :



$$12FK + 3SO^4Na^2 + (SO^4)^3Al^2 = F^6Al^2,6FNa + 6SO^4K^2.$$

Le *procédé Hulin*, utilisé en France par la Société d'électrochimie, consiste à neutraliser de l'alumine hydratée pure à l'aide d'acide fluorhydrique provenant de la fluorine. On obtient ainsi de l'acide fluoaluminique, de formule $F^6Al^2,6FH$. Ce dernier, saturé par du bioxyde de sodium, donne immédiatement, d'une part de la cryolithe insoluble et, d'autre part, de l'eau oxygénée. Celle-ci, très pure, constitue un sous-produit important de la fabrication et diminue le prix de revient de la cryolithe ainsi obtenue.

La cryolithe naturelle ou artificielle fond vers 1.000°. L'addition de quantités croissantes d'alumine abaisse d'abord le point de fusion du bain et le relève ensuite, comme le montrent les chiffres ci-dessous :

Cryolithe.	Alumine.	Point de fusion.
100 %	0 %	1.000° C.
97	3	974
96	4	960
95	5	915 (minimum)
94	6	960
93	7	982
92	8	992
90	10	980
85	15	994
80	20	1.015

Il résulte de ces chiffres que, lorsque la teneur en alumine varie entre 0 et 5 %, le point de fusion s'abaisse graduellement de 1.000

à 915° (*fig.* 1). Le pourcentage d'alumine continuant à croître jusqu'à 20 %, le point de fusion se relève de 915 à 1015°. Il paraît y avoir un second minimum à 10 % d'alumine (980°), mais il n'est pas très net et l'on peut avoir quelques doutes sur son existence. Il semble qu'au-dessus de 20 % d'alumine, le bain devienne franchement pâteux aux températures usuelles de travail. Dans la pratique, on doit donc se maintenir entre 900° et 950° et, autant que possible, dans la partie hachurée ABC de la figure.

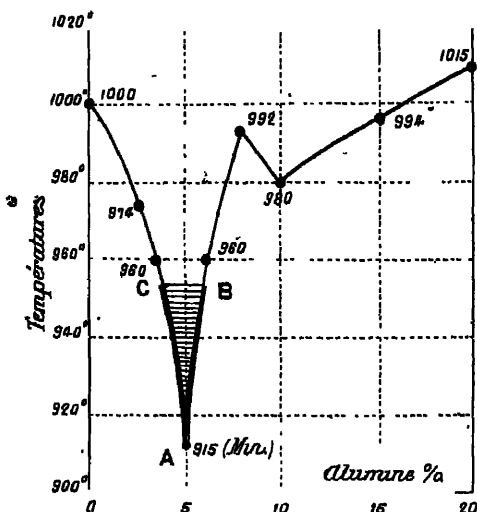


Fig. 1. — Courbe de fusibilité des melanges de cryolithe et d'alumine.

En ajoutant au mélange de cryolithe et d'alumine du fluorure de calcium ou du fluorure d'aluminium, on peut encore abaisser le point de fusion du bain et obtenir ainsi des mélanges notablement plus fusibles que la cryolithe. De là l'emploi des *fondants* qui permettent, par un choix judicieux, d'opérer l'électrolyse à une température relativement basse tout en conservant au bain son homogénéité physique et une fluidité suffisante. On fabrique des mélanges notablement plus fusibles que la cryolithe en additionnant cette dernière, soit de fluorure d'aluminium, soit de fluorure de calcium, soit d'une certaine proportion de ces sels mélangés. D'après Hall, le point de fusion du bain serait ainsi abaissé à 800° et ce mélange permettrait de dissoudre l'alumine en proportion plus forte que la cryolithe seule. Les chlorures alcalins feraient descendre le point de fusion à un chiffre encore plus bas, soit 700°, mais ils présentent l'inconvénient de donner des bains de composition instable à cause de la volatilisation rapide de ces sels. Quoi qu'il en soit, dans les usines appliquant le procédé Hall, qui est

sensiblement le même que celui d'Héroult, on utilise le mélange suivant :

Cryolithe	36 %
Fluorure de calcium	20
Fluorure d'aluminium	44

En France, il semble qu'on ait renoncé, au moins dans ces dix dernières années, à un pourcentage aussi élevé de fluorure d'aluminium.

Le fluorure de calcium est toujours employé à l'état de composé naturel, c'est-à-dire de fluorine. Le fluorure d'aluminium s'obtient de différentes manières, notamment en chauffant à siccité un mélange de sulfate d'aluminium et de cryolithe (procédé Grabau). Mais la méthode la plus couramment employée consiste à faire agir, à la température ordinaire, de l'acide fluorhydrique en solution, soit sur de la bauxite, soit sur de l'alumine hydratée. D'après M. Flusin, il n'est cependant pas facile de préparer cette substance parfaitement pure, car le produit industriel renferme toujours de 1,5 à 3 % de silice et même, assez fréquemment, de 0,5 à 0,9 % de soufre.

Électrodes. — Elles jouent un rôle très important dans la fabrication de l'aluminium, car c'est plus de leur pureté que de celle de l'alumine et de la cryolithe que dépend la qualité du métal obtenu. Aussi doit-on utiliser pour leur préparation un charbon aussi pur que possible, possédant très peu de cendres et exempt autant qu'il se peut de fer et de silicium. La matière première servant à leur préparation peut être du coke de pétrole ou de goudron, ou encore de l'anthracite. C'est le coke de pétrole qui domine sur le marché; il ne contient généralement que 0,5 à 2 % de cendres, mais parfois jusqu'à 1,25 % de soufre; les matières volatiles représentent 12 à 15 %; on cherche à les expulser le plus possible avant emploi et, à cet effet, on fait subir au coke une nouvelle cuisson dans des cornues verticales en terre réfractaire. Le coke des cornues à gaz est rarement employé, car il est ordinairement trop riche en silice à cause des fragments de pâte réfractaire qui y restent adhérents.

Pour la fabrication des électrodes, le coke est d'abord concassé et broyé, puis mélangé avec du goudron chauffé. La pâte obtenue est comprimée, puis étirée en prismes au moyen d'une puissante presse horizontale. Ces prismes sont divisés en sections de longueur convenable, puis cuits au rouge vif. On obtient ainsi des électrodes assez denses, homogènes et suffisamment conductrices de l'électricité. Nous donnons ci-dessous l'analyse moyenne d'un lot d'électrodes ainsi obtenues :

Carbone fixe		97,20 %
Cendres	Silice	0,55
	Sesquioxyde de fer	0,44
	Divers	0,41
Humidité		0,35
Matières volatiles	Hydrogène	0,23
	Autres gaz	0,42
Soufre		0,40

La forme et les dimensions des électrodes varient suivant les usines. Tantôt on leur conserve la section carrée de $0^{m},25$ de côté, tantôt on leur préfère la section rectangulaire, généralement $0^{m},10$ sur $0^{m},08$ afin de diminuer leur poids. Pour combattre l'usure due à la combustion (environ $0^{kg},7$ à 1 kilogramme d'anodes brûlées par kilogramme d'aluminium), certaines usines donnent aux électrodes la forme d'un cube ou d'un tronc de pyramide dont la petite base plonge dans le bain ; l'électrode est ainsi immergée presque entièrement et l'usure de la partie émergente est évitée ; la section est alors de 25 à 30 centimètres de côté, la longueur de 30 à 50 centimètres ; ces dimensions correspondent à un poids de 35 à 70 kilogrammes par électrode.

Il est très important, pour éviter des pertes, d'établir une connexion parfaite entre les électrodes et les conducteurs qui les relient à la canalisation électrique. D'autre part, il faut que les pièces métalliques constituant cette connexion n'aient pas à souffrir du voisinage du bain. La connexion axiale est celle qui paraît le mieux convenir. Dans ce but, on fore après fabrication, sur l'axe des électrodes et à l'une des extrémités de celle-ci, un trou dans lequel on insère la partie terminale du câble. Pour assurer la solidité du joint, certaines usines procèdent par filetage en pas de vis ;

dans d'autres, après avoir fileté la partie supérieure du trou foré dans la pâte, on introduit dans celui-ci une tige ou une lame de cuivre qu'on fixe en coulant du bronze dans l'intervalle. Le scellement se fait avant ou après la cuisson de l'électrode suivant les cas. Le joint est généralement très solide, ce qui permet d'utiliser le charbon presque jusqu'à son extrémité supérieure, c'est-à-dire jusqu'à usure complète. Cette considération est importante, le prix moyen des électrodes variant entre 350 et 380 francs la tonne.

Lorsqu'on est dans l'impossibilité d'utiliser les électrodes entièrement, on fait rentrer les déchets en fabrication. On a cependant cherché, dans ces derniers temps, divers procédés permettant de reconstituer des électrodes neuves à l'aide des fragments ayant des dimensions suffisantes. La méthode qui paraît la plus digne d'intérêt est celle qui procède par sciage et filetage des morceaux et réunion de ceux-ci par d'autres fragments de charbon graphitique préparés d'avance pour ce filetage.

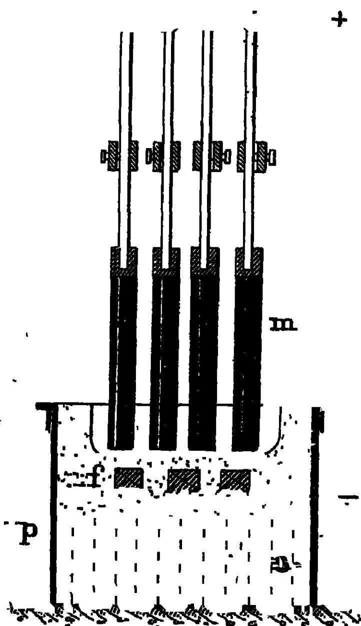


Fig. 2. — Four à aluminium sans fond métallique.

II. — Fabrication.

Fours. — Il existe plusieurs modèles de fours, ou *cuves*, ou *marmites*, destinés à la fabrication de l'aluminium. Certains (*fig.* 2) sont dépourvus de fond métallique et sont posés sur un massif en maçonnerie réfractaire *s*. Le trou de coulée est généralement percé sur un des longs côtés, le four affectant une forme rectangulaire. Le garnissage intérieur *f* est constitué parfois uniquement par un pisé de carbone; mais souvent on réduit la dépense de celui-ci en appliquant contre les parois *p* en tôle un premier revête-

ment en briques réfractaires. Le fond du creuset est presque toujours formé d'une couche épaisse de pisé de carbone. Dans l'ensemble du garnissage ou de la couche de fond sont noyés plusieurs fers plats, de section suffisante et reliés à l'électrode négative de la source d'énergie électrique. Le pisé est semi-conducteur de l'électricité ; mais la présence des fers a pour effet d'augmenter beaucoup la conductibilité. Les anodes *m* sont formées par des prismes de charbon aggloméré, comme il a été dit plus haut; elles montent et descendent simultanément ou individuellement, soit à la main, soit à l'aide d'engrenages fonctionnant mécaniquement. En raison de leurs poids, elles doivent être soutenues par un mode de suspension très robuste.

L'inconvénient de ce dispositif est d'entraîner un fort dégagement de vapeurs de goudron au moment de la mise en train de chaque cuve neuve ; ces vapeurs sont dues au fait que le pisé de carbone doit subir la cuisson sur place en raison de son volume. En outre, ce pisé n'acquiert jamais une conductibilité suffisante, comparable, par exemple, à celle des électrodes de carbone étirées sous pression et cuites à haute température.

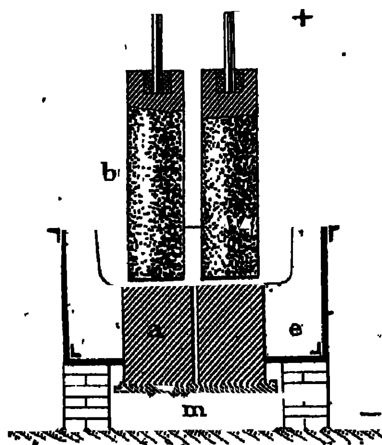


Fig. 3. — Four à aluminium à cathode-sole.

Aussi a-t-on recours, dans beaucoup d'usines, à la disposition représentée par la figure 3. Le four comporte un fond percé et, à travers l'ouverture ainsi ménagée, on fait passer un faisceau composé de 8 à 10 électrodes prismatiques *a*; ces dernières, qui ont environ 30 centimètres de côté, sont serrées les unes contre les autres et reposent sur une plaque épaisse en fer *m* reliée au pôle négatif de la source de courant. L'extrémité supérieure du faisceau est approximativement au niveau de la base du creuset et, tout autour, on dame fortement et régulièrement avec du pisé de car-

bone *e*. On assure ainsi l'étanchéité des joints et, en même temps, la résistance du circuit est diminuée. A chaque électrode de fond *a* correspond généralement une anode *b* de section un peu moindre. Le dégagement des vapeurs de goudron est ainsi de beaucoup diminué.

Bien entendu, le fond du creuset présente une pente régulière quoique douce vers le trou de coulée. Pendant l'opération, celui-ci est bouché avec du pisé de carbone. La coulée s'effectue ainsi très facilement.

Les électrodes mobiles, ou anodes, sont plus ou moins nombreuses suivant leur section. Quand celle-ci est faible (8 à 10 centimètres de côté), on les dispose par quatre rangées de huit ou neuf électrodes chacune, ce qui fait au total 32 ou 36 électrodes pour une surface totale de 0^{m2},256 ou 0^{m2},288. Avec les charbons de 25 centimètres de côté, on fait généralement deux rangées de cinq électrodes, correspondant à une surface totale de 0^{m2},625.

Conduite de l'opération. — La principale condition que doit remplir le bain électrolytique est d'être moins dense que le métal pour permettre à celui-ci de se rassembler au fond de la cuve au fur et à mesure de sa production. De plus, il doit être constamment protégé contre l'oxydation par une nappe suffisamment épaisse de sels fondus, bien que l'oxydabilité de l'aluminium fondu à l'air soit pratiquement négligeable. La densité joue donc un rôle important dans cette opération. Or, on sait que la cryolithe solide a une densité de 2,92; à l'état liquide, celle-ci n'est plus que de 2,08. Celle de l'aluminium à l'état solide est de 2,66 et, à l'état fondu, de 2,54. Ainsi, l'aluminium solide, quoique moins dense que la cryolithe solide, ira cependant se réunir au fond de la cuve quand le bain sera constitué, comme c'est en pratique, par de la cryolithe fondue. La différence de densité des deux substances est en effet dans cet état de 0,46. L'addition d'alumine et de fondants n'augmente pas la densité du bain et la différence entre cette dernière et celle du métal fondu est généralement suffisante pour qu'on puisse extraire ce dernier régulièrement par coulée. Les phénomènes d'inversion des densités, dues à un mélange défectueux des composants du bain, sont en effet très rares. On cherche à les éviter à tout prix,

car ils nécessitent la mise hors de service momentanée de la cuve.

Une opération complète comprend l'alimentation en matières premières, le réglage, le changement des électrodes, s'il y a lieu, et la coulée.

Pour faire la mise en marche des fours, on met en court-circuit les électrodes supérieures et le fond de la cuve par l'intermédiaire d'une résistance ; celle-ci est généralement constituée par de petits blocs de charbon. Puis, peu à peu, on introduit dans la cuve de la cryolithe pure ou additionnée de fondants. Quand ces matières sont passées à l'état liquide, on laisse le courant atteindre progressivement son intensité normale, et on l'alimente en cryolithe et fondants. Après avoir remonté lentement les anodes, et quand le volume du bain est suffisant, on charge en alumine et on agite fréquemment pour favoriser sa dissolution.

Le bain devant être protégé continuellement contre l'action oxydante et refroidissante de l'air, on le recouvre d'une couche d'alumine en poudre qui fond au contact des anodes. Comme le bain s'appauvrit de plus en plus en alumine au fur et à mesure que l'électrolyse se poursuit et que le métal se dépose, on compense les pertes d'alumine. Un dispositif très ingénieux permet d'effectuer les additions d'oxyde au moment opportun ; il consiste en une lampe ou une série de lampes à incandescence montées en dérivation aux bornes des fours ; la résistance des filaments est calculée de façon que la lampe s'éclaire dès que le pourcentage d'alumine est insuffisant. L'addition du mélange de cryolithe et de fondants ne se fait qu'à intervalles de plusieurs jours.

Le mauvais réglage d'un four se voit du reste assez aisément : si l'allure est trop chaude, la flamme qui entoure les anodes se développe et se colore en jaune, et le remède est d'abaisser les anodes.

L'aluminium s'accumule progressivement au fond de la cuve. Les coulées se font tous les deux ou trois jours environ suivant les dimensions des fours. On les effectue, non pas directement, mais dans une poche qui retient à l'état solide les fluorures entraînés.

Installations. — Les fours sont installés dans des salles de grandes dimensions et généralement en rangées parallèles. Mais on

adopte aussi, dans certaines usines, la disposition en crémaillère, c'est-à-dire par lignes un peu obliques par rapport à la section transversale du bâtiment; les fours se touchent successivement par un angle. Cette disposition, économique au point de vue de l'installation, est incommode pour le travail et favorise l'accumulation de la chaleur dans la salle; aussi la tendance actuelle est-elle dans l'adoption de salles ne comportant qu'une ligne de fours.

Rendement. — En fonctionnement normal, le rendement pratique ou économique se rapproche sensiblement du rendement théorique et varie entre 90 et 95 %. Cependant la production moyenne annuelle n'atteint pas ce pourcentage et cela se comprend : le rendement est en effet fonction du nombre de fours fonctionnant simultanément, de la puissance de chaque four, des accidents de marche, etc. D'après M. Flusin, la production moyenne d'aluminium oscille entre 210 et 275 kilogrammes de métal par kilowatt-an, soit entre 154 et 202 kilogrammes par cheval-an. Ce rendement correspond à une dépense d'énergie comprise entre 31 et 41 kilowatts-heure par kilogramme d'aluminium et à un rendement industriel compris entre 58 et 76 %.

Quant à la consommation des matières premières, elle est facile à calculer par kilogramme de métal obtenu. Il faut compter sur une dépense de 2 kilogrammes au moins d'alumine et une consommation de 700 grammes à 1 kilogramme de déchets et d'usure des anodes. La consommation de cryolithe et de fondants est très faible, soit 120 à 200 grammes pour la cryolithe et 200 grammes environ pour les fluorures de calcium et d'aluminium.

Les pertes de ces produits proviennent des électrolyses secondaires, de la volatilisation, des traitements mécaniques (broyage, etc.). La bonne conduite des cuves les réduit dans une assez forte proportion.

Réduction directe de l'alumine par le charbon. — La réalisation pratique de la réduction électrothermique de l'alumine a toujours été considérée comme très difficile. En effet, si l'on essaie de réduire l'alumine seule, on risque de volatiliser une partie de l'aluminium et de le transformer en alumine au contact des parties

les moins chaudes de l'appareil, et l'aluminium non volatilisé peut se transformer en carbure. Cela explique pourquoi les essais tentés dans ce sens n'ont pu entrer dans le domaine industriel.

Lorsqu'on cherche à réduire l'alumine par le charbon, la réaction se passe comme si l'on obtenait, non pas de l'aluminium, mais du *carbure* de ce métal ; c'est un phénomène analogue à celui de la réduction de la chaux par le charbon : on obtient, non point du calcium, mais du carbure de calcium. Si on laisse le bain se refroidir lentement lors de sa formation, ou si on le maintient à 700 ou 800°, c'est-à-dire à une température légèrement supérieure à celle du point de fusion de l'aluminium, on voit de l'aluminium métallique sourdre du carbure et l'on peut recueillir ainsi un poids de métal égal à la moitié de l'aluminium total contenu dans le produit ; celui-ci prend une coloration de plus en plus foncée à mesure que le métal s'écoule.

D'où vient l'aluminium ainsi libéré? Il a une double origine et il provient :

a) De la réduction directe de l'alumine par le charbon, de sorte que le produit sortant du four est un mélange, en proportions variables, d'aluminium et de carbure d'aluminium, ou plutôt une solution du métal dans le carbure d'aluminium ;

b) De la dissociation du carbure d'aluminium, qu'une élévation de température suffisante décompose en ses éléments : l'aluminium distille vers les régions froides du four ou se dissout dans le carbure subsistant, tandis que le carbone reste à l'état de graphite.

On peut, en somme, conclure avec Askenasy que, pour obtenir par réduction électrothermique directe de l'alumine par le charbon de grandes quantités d'aluminium, il faudra : ou bien ne pas dépasser sensiblement la température d'ébullition du métal (1.800°), ou bien employer un dispositif de condensation des vapeurs métalliques.

De nouvelles recherches et de nombreux essais sont cependant encore nécessaires avant que l'on puisse espérer réussir à fixer les bases d'un procédé industriel ayant un rendement satisfaisant.

Il en est autrement de la réduction de l'alumine par le carbone en présence du fer et du cuivre. A la température du four électrique, cette réduction s'effectue aisément et convenablement : non seule-

ment ces métaux, assez fixes pour ne pas se volatiliser à la température nécessaire à la réduction, absorbent les vapeurs d'aluminium, mais aussi empêchent ce métal de passer à l'état de carbure. On obtient donc, non pas de l'aluminium pur, mais un alliage d'aluminium : ferro ou cupro-aluminium. C'est sur ce principe qu'est basé le procédé Cowles.

On a aussi cherché à substituer au carbone un mélange de chaux et de charbon (procédé Tucker et Moody), mais la réaction donne surtout naissance à du carbure d'aluminium si l'opération n'est pas surveillée de près. D'après les inventeurs, il se formerait d'abord du carbure de calcium par réaction entre la chaux et le charbon à la température de l'arc électrique. Ce carbure, grâce à son caractère de combinaison exothermique, produirait une quantité de chaleur facilitant la réduction de l'alumine. La durée de l'opération a une grande importance sur les résultats obtenus; elle doit être relativement courte pour éviter la production de carbure d'aluminium. Le meilleur résultat paraît être obtenu en mélangeant 150 parties d'alumine, 200 de carbonate de calcium et 60 de coke.

Emploi du sulfure d'aluminium. — Le procédé Lecesne, qui aurait été étudié et essayé industriellement, repose sur l'action de l'aluminium sur le sulfure d'aluminium anhydre. D'après l'inventeur, chaque fois qu'un mélange intime d'alumine et de charbon est mis en présence du soufre, il se forme du sulfure d'aluminium en même temps qu'il se dégage de l'oxyde de carbone. Ce sulfure d'aluminium anhydre, plus ou moins pur, mis en contact, à l'abri de l'air, avec de l'aluminium porté à haute température, se décompose en aluminium métallique et en soufre récupérable en nature.

Ces deux opérations, combinées en une seule, permettent d'obtenir industriellement de l'aluminium. On procède comme suit :

La *bauxite*, finement broyée avec un *charbon* aussi exempt que possible de cendres, est mise en masse verticale, un peu tassée, sur de l'*aluminium* qu'on chauffe fortement. Quand la bauxite et le charbon ont atteint une température suffisante, on introduit du *soufre* dans l'appareil, en un point qui se trouve sensiblement au niveau du contact de la bauxite et de l'aluminium.

Par suite de réactions inverses, il se forme immédiatement du

sulfure d'aluminium et de l'aluminium métallique qu'on fait écouler de l'appareil par l'ouverture qui sert à l'introduction du soufre.

La même masse de soufre peut servir, grâce à ces réactions inverses, à transformer constamment les charges successives de bauxite et de charbon en aluminium. L'opération n'est limitée que par l'encrassement résiduel dû au fer et au sulfure de fer qui se précipitent et aux impuretés qui surnagent à la surface du métal fondu. Le fer contenu dans la bauxite occasionne une légère perte de soufre, mais ne constitue pas un obstacle à la marche régulière de l'opération, pas plus du reste que la silice renfermée dans ce minerai.

Les procédés utilisant la réduction électrothermique et électrolytique du sulfure d'aluminium (Gooch, Peniakoff, Gin), de même que ceux basés sur l'électrolyse des sels haloïdes de l'aluminium, n'ont pas donné de résultats applicables à l'industrie.

Emploi des silicates d'alumine (argiles). — L'utilisation des argiles pour la fabrication de l'aluminium présente une grande importance industrielle et économique car, résolue pratiquement, elle permettrait de vulgariser encore davantage les emplois de ce métal en abaissant considérablement les prix actuels. Plusieurs solutions ont été proposées et mises à l'essai :

Dans le *procédé Cowles-Kayser*, on part de l'argile ordinaire Al^2O^3, $2SiO^2$ que l'on pétrit avec du charbon et du sel marin. Le mélange est porté à 1.000° environ et soumis à l'action de la vapeur d'eau. Celle-ci, décomposée par le charbon à haute température, donne : de l'hydrogène qui se porte sur le chlore du sel marin pour former de l'acide chlorhydrique; de l'oxygène qui se porte sur le sodium pour former de la soude; de l'oxyde de carbone qui peut être employé comme agent de chauffage ou de force motrice ; enfin un silicate d'alumine complexe correspondant approximativement à la formule $(SiO^2)^2, Al^2O^3, (Na^2O)^2$.

C'est ce silicate qu'on utilise pour l'extraction de l'alumine. Pour cela, on le traite par la chaux vive : on obtient du silicate bicalcique, de la soude et de l'alumine qui peut servir directement à la préparation de l'aluminium métallique.

Quant au silicate bicalcique, chauffé dans un four à ciment avec une proportion convenable de chaux, il fournit un excellent ciment hydraulique, exempt de toute trace de fer, celui-ci ayant été complètement éliminé par les opérations précédentes.

Dans le *procédé Moldentrauer*, qui permettrait d'abaisser le prix de l'aluminium à 0 fr. 50 le kilogramme, on s'est basé sur cette remarque d'expérience qu'en essayant de décomposer le carbure double d'aluminium et de silicium par l'oxyde de fer, on observe la volatilisation d'une partie de l'alumine. Pour obtenir cette dernière, on peut donc opérer en distillant au four électrique un mélange de silicate d'alumine, d'oxyde de fer et de charbon.

Dans ce but, on fait un mélange d'argile, d'hématite et de coke qu'on soumet, après broyage, à l'action d'un courant d'intensité élevée. On obtient un mélange de ferrosilicium, un résidu liquéfié et des produits de condensation que l'on entraîne hors du four par un tube coudé. Ces derniers ont pour composition centésimale :

SiO^2	24,3 %
Fe	2,1
Al^2O^3	72,4

Le ferro-silicium a une teneur en silicium de 19,75 %. Le résidu contient des fragments de ferro-silicium. Le reste a la composition suivante :

Silice	2,52 %
Oxyde de fer	0,25
Chaux	Traces
Alumine	97,12

Cette dernière est de l'alumine fondue. On obtient donc directement, à partir de l'argile, du ferro-silicium sous une couverte d'alumine. Le procédé a été rendu plus pratique en diminuant le pourcentage des sous-produits formés et surtout la quantité d'énergie dépensée pour la réduction de Fe^2O^3 qu'on peut utiliser à meilleur compte. En changeant la proportion d'oxyde de fer et en introduisant une partie du fer sous forme de ferro-silicium, on arrive à produire un mélange contenant presque exclusivement du ferro-silicium et de l'alumine. Cette dernière, broyée et purifiée par

l'aimant des globules de ferro-silicium qu'elle peut contenir, est de l'alumine à peu près pure. Elle permet d'obtenir environ 70 % de la proportion d'alumine qu'indique la théorie.

La question de l'utilisation de l'argile pour la fabrication de l'alumine et de l'aluminium est donc, en principe, résolue. Un premier four électrique donne un ferro-silicium à forte teneur en silicium et une alumine impure qui, refondue dans un second four électrique, est prête à subir l'électrolyse pour l'obtention de l'aluminium.

L'ensemble de la réaction peut être représenté par l'équation suivante :



$$Al^2O^3,2SiO^2 + 2Fe^2O^3 + 13C = 2Al + 2Fe^2Si + 13CO.$$

L'argile étant l'un des produits les plus répandus dans la nature, il y a lieu de penser que l'extraction de l'aluminium par son emploi permettra la solution pratique et économique d'un problème métallurgique et industriel fort important. Les débouchés de l'aluminium ne pourront qu'en bénéficier, étant données les nombreuses applications dont ce métal est susceptible.

III. — Production et consommation.

Principaux pays producteurs. — Jusqu'en 1896, la Suisse est restée à la tête des pays producteurs d'aluminium ; depuis, elle s'est laissé progressivement distancer et, actuellement, on peut classer comme suit les divers pays qui s'occupent de cette industrie au point de vue fabrication :

	Production annuelle.
États-Unis et Canada	28.500 tonnes
France	18.000 —
Suisse	12.000 —
Allemagne et Autriche-Hongrie	10.000 —
Angleterre	7.000 —
Norvège	1.500 —
Italie	1.000 —

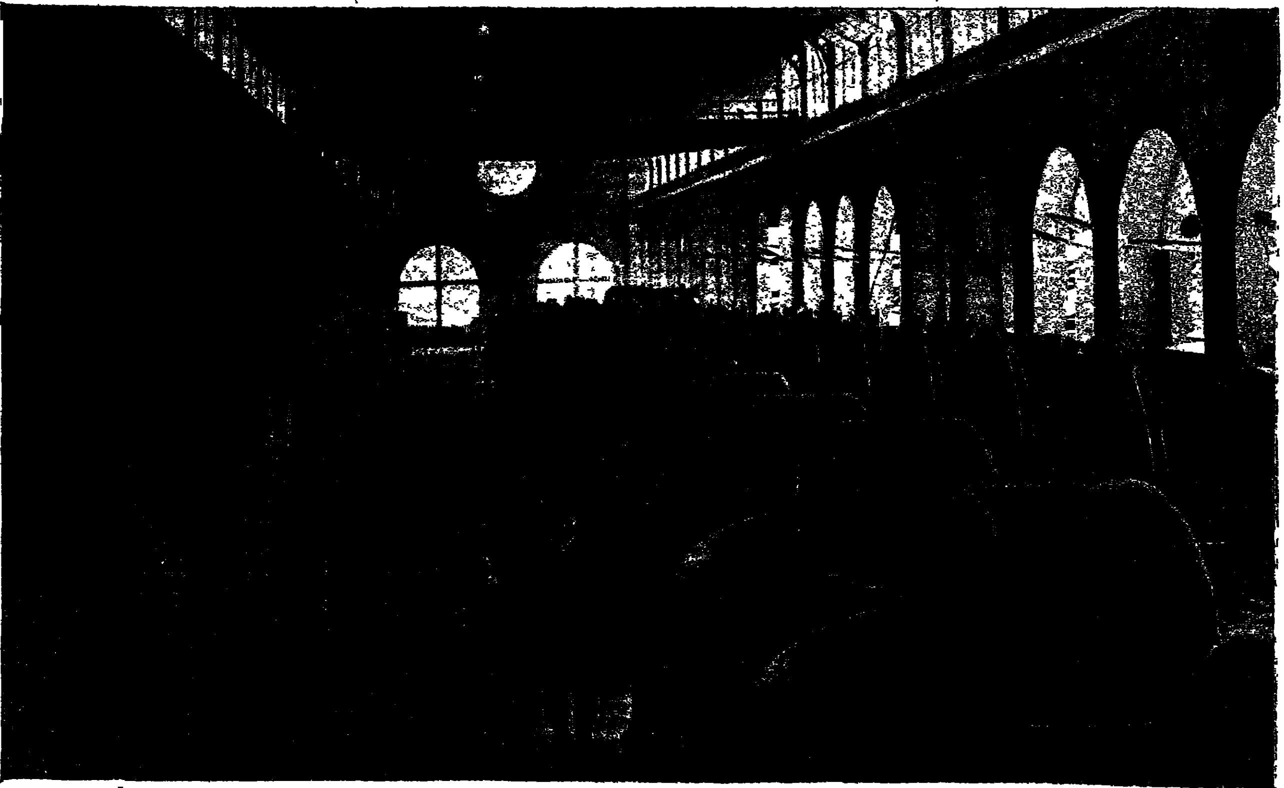


FIG. 4. — Salle des turbo-dynamos de l'usine à aluminium de Saint-Michel-de-Maurienne (Savoie) appartenant à la Société électrométallurgique française.

Compagnie des produits chimiques d'Alais et de la Camargue :

	Tonnes d'aluminium.
Usine de Calipso (Savoie)	7.000
Usine de Saint-Jean-de-Maurienne (Savoie)	
Usine de Saint-Félix-de-Maurienne (Savoie)	
Usine de Pontamafrey (Savoie)	

Société d'électrochimie :

Usine de Prémont (Savoie)	1.000

Société des produits électrochimiques des Pyrénées :

Usine d'Auzat (Ariège)	3.000

Comme on le voit, les principales usines se trouvent concentrées en Savoie, dans la vallée de la Maurienne. Depuis Modane jusqu'à Saint-Jean-de-Maurienne, on en compte six représentant près de 80.000 chevaux.

Usines étrangères. — En dehors de la France, on trouve comme principales Sociétés d'aluminium les suivantes :

Aluminium Industrie Gesellschaft :

	Tonnes d'aluminium.
Usine de Neuhausen (Suisse)	1.000
Usine de Chippis (Suisse)	1.000
Usine de Rheinfelden (Allemagne)	600
Usine de Lend-Gastein (Autriche)	1.200

British Aluminium C° :

Usine de Foyers (Écosse)	800
Usine de Stangfjord (Norvège)	1.000

Aluminium Corporation :

Usine de Dolgarrog (Pays de Galles)	1.800

Anglo-Norvegian Aluminium C° :

Usine de Vigeland (Norvège)	500

Societa italiana per la fabricazione dell'Alluminin io :

	Tonnes d'aluminium.
Usine de Bussi-Pescara	1.200

Société italienne d'Aluminium :

Usine de Popoli	1.000

The Aluminium Company of America et *Northern aluminium Cy of Canada :*

Usine de Niagara Falls	30.000
Usine de Masséna	
Usine de Québec	
Usine de Shawinigan-Falls	

Production mondiale. — En totalisant la puissance et la capacité de production de toutes les usines du monde fonctionnant régulièrement, on constate que plus de 350.000 chevaux sont actuellement consacrés à la seule fabrication de l'aluminium ; la capacité de production annuelle est voisine de 75.000 tonnes d'aluminium.

Jusqu'en 1906, la consommation et la production sont restées à peu près équivalentes, mais en 1907, par suite de la chute des brevets Héroult dans le domaine public et de la création de nouvelles usines, il y a eu surproduction. En 1908, il en a été de même. En 1909 et 1910, le phénomène inverse s'est produit et les demandes ont surpassé la production. Il s'est finalement manifesté une sorte d'équilibre dans la production et la consommation.

Situation des usines. — A la fin de l'année 1910, les sociétés françaises productrices d'aluminium ont fait une entente qui a abouti à la création d'un Syndicat français de l'aluminium pour une durée de 10 ans. Il y a lieu de s'en féliciter car la France ne consomme guère que le tiers de ce qu'elle peut produire et elle doit ainsi nécessairement chercher dans l'exportation un écoulement de son excès de production. L'exportation croît du reste progressivement : alors qu'elle n'était que de 660 tonnes en 1904, elle

devint de 1.500 tonnes en 1906 et de 4.400 tonnes en 1909. Elle atteint aujourd'hui des chiffres beaucoup plus élevés encore. L'aluminium français lutte donc avec succès contre l'aluminium étranger et cela est d'autant plus intéressant que notre pays est en mesure de satisfaire des demandes importantes. Ajoutons que pour utiliser l'excès de puissance dont elles disposent, beaucoup d'usines se livrent à d'autres fabrications telles que : ferro-alliages, carbure de calcium, carborundum, émeri artificiel, alliages spéciaux, etc.

La puissance aménagée dans le monde entier en vue de la fabrication de l'aluminium est de 550.000 chevaux environ; elle représente une puissance effective moindre, évaluée à 450.000 chevaux moyens. Au rendement de 200 kilogrammes par cheval-an, les usines pourraient fournir ensemble environ 75.000 tonnes de ce métal, chiffre indiqué plus haut.

Prix. — Le prix du kilogramme d'aluminium a subi quelques variations dans ces dernières années, et les variations des prix de vente ont suivi dans une certaine mesure celles du prix de revient; elles ont subi en outre l'influence des modifications d'équilibre entre la production et la consommation. En 1855, le kilogramme d'aluminium valait 1.250 francs : c'était encore, lors de la découverte de Deville, presque un métal précieux. Dans la période 1855-1866, il tomba à 125 francs. En 1886, il descendit à 78 francs. Lors de l'apparition des procédés électrochimiques, une nouvelle baisse, encore plus sensible, se manifesta et, en 1890, le métal tomba à 19 francs. Nous le voyons diminuer ensuite graduellement : à 7 fr. 50 en 1892, à 3 fr. 10 en 1897, à 2 fr. 50 en 1900. En 1905, on constate un relèvement des prix dû à la difficulté de production par suite des conditions climatériques et des grèves (4 fr. 50 en 1905, 4 fr. 35 en 1907). Depuis 1908, en raison de l'expiration des brevets Héroult et de l'accroissement des moyens de production, le métal est retombé au-dessous de 2 francs. Le cours varie entre 1 fr. 70 et 2 fr. 50 depuis une dizaine d'années. Cependant, au cours de ces dernières années, on a noté des hausses importantes dues au fait de la guerre. Voici en effet les chiffres du prix du kilogramme, à partir de 1910 :

Années.	Prix du kilogramme
—	—
1910...........................	1 fr. 60 à 2 fr.
1911...........................	1 fr. 30 à 1 fr. 70
1912...........................	1 fr. 70 à 2 fr. 15
1913 (janvier)......................	2 fr. 90
1914............................	2 fr. à 2 fr. 10
1915 (décembre)..................	6 fr. 30
1916 —	6 fr. 80 à 7 fr.

Ces prix concernent l'aluminium commercial pur à 98-99 %.

Le développement considérable des applications de l'aluminium, notamment dans la construction des lignes électriques, a placé ce métal au sixième rang parmi les métaux usuels. C'est un succès remarquable, étant donné qu'il peut ainsi, par son faible prix de revient, concurrencer le cuivre dans l'une de ses applications les plus importantes. La fabrication des alliages le substitue en outre partiellement au zinc, au magnésium, à l'étain, etc., et tend ainsi à généraliser et à étendre de plus en plus ses emplois.

CHAPITRE II

PROPRIÉTÉS DE L'ALUMINIUM

I. — Propriétés physiques et mécaniques.

Densité. — Elle varie suivant la pureté du métal, son mode de préparation, sa cohésion, les traitements mécaniques ou métallurgiques. Elle est généralement comprise entre 2,56 et 2,75. L'aluminium est donc le plus léger des métaux usuels; si on le compare à ce titre au cuivre ($d = 8,8$), au zinc ($d = 6,9$), à l'étain ($d = 7,3$), on voit qu'il est environ 3,3 fois plus léger que le cuivre, 2,5 fois plus que le zinc et 2,7 fois plus que l'étain. C'est là une de ses propriétés importantes au point de vue de ses emplois.

Les recherches de Kohn-Abrest sur un échantillon à 99,3 % d'aluminium provenant des usines de Froges ont conduit au chiffre de 2,7573 comme densité moyenne à 0°. A 15°, on trouve 2,6697 et, à 20°, 2,6570. Ces déterminations ont été faites par la méthode du flacon avec les précautions nécessaires. L'aluminium laminé ou tréfilé a pour densité 2,7.

Poids atomique. — Il se rapproche sensiblement de 27. La Commission des poids atomiques a adopté le chiffre 26,9 en prenant H = 1 et O = 15,88. Kohn-Abrest indique 27,09. Ces résultats ne sont pas très concordants, ce qui tient surtout au peu d'homogénéité des échantillons d'aluminium industriel. En préparant à l'état du pureté du sulfate d'alumine neutre, Baubigny a trouvé 26,992.

Conductibilité calorifique. Chaleur spécifique. — D'après Lorenz, la *conductibilité calorifique* de l'aluminium est égale à 36; seules les conductibilités de l'argent (100) et du cuivre (75) sont plus élevées. Et, ainsi que le laisse prévoir la loi de Dulong et Petit, la *chaleur spécifique* de ce métal, soit 0,22, est de beaucoup supérieure à celle des métaux usuels tels que le fer (0,11) et le cuivre (0,09). Son *pouvoir émissif* est relativement faible. Ces trois qualités, jointes à la légèreté de l'aluminium, rendent ce métal éminemment propre à la fabrication des ustensiles de cuisine et de ménage.

Couleur. — L'aluminium est blanc bleuâtre, blanc d'argent ou blanc grisâtre suivant les échantillons. Ces différences dépendent de la nature et de la quantité d'impuretés contenues dans le métal (silicium, fer, carbone) et qui modifient sa structure moléculaire.

Sonorité. — La sonorité de l'aluminium, propriété assez peu connue, est telle qu'un lingot de ce métal suspendu à un fil émet un son de cristal lorsqu'on le frappe. Cette propriété est susceptible de nombreuses applications concurremment aux bronzes.

Conductibilité électrique. Résistivité. — La conductibilité électrique de l'aluminium est une de ses principales qualités; on l'applique surtout dans l'industrie électrique pour la fabrication et l'emploi de ce métal comme conducteur de courant (v. p. 88). A cet égard, l'aluminium se place immédiatement après l'argent, le cuivre et l'or. Sa conductibilité électrique est de 59 à 60 °/₀ celle du cuivre. Pour les calculs, on estime respectivement à 18 et 30 ohms les résistances électriques d'un fil de cuivre et d'un fil d'aluminium de 1 kilomètre de longueur et de 1 millimètre carré de section.

La *résistivité* de l'aluminium, qu'expriment du reste ces derniers chiffres, varie avec la teneur et la nature des impuretés du métal. Elle est représentée par le chiffre moyen de 2,78, celle du cuivre (cuivre électrique commercial) étant de 1,67 microhm-centimètre à 0° C. La présence du fer et du silicium relève cette résistivité; le coefficient de température est d'autant plus élevé que la teneur du métal en impuretés est elle-même plus grande. Cette propriété

constitue, avec la thermo-électricité, une méthode sûre pour apprécier la pureté du métal. M. Pécheux a trouvé les chiffres de :

$$\rho_0 = 2{,}72\,; \quad \rho_0 = 2{,}75\,; \quad \rho_0 = 2{,}80,$$

pour la résistivité en microhms-centimètre à 0° de trois échantillons d'aluminium commercial ; les mesures étaient faites au pont à corde de Wheatstone; les échantillons, convenablement recuits et contournés en spirale, étaient chauffés dans un bain de paraffine ; les températures étaient fournies par un pyromètre nickel-cuivre dont la soudure chaude se trouvait au centre des spirales d'aluminium.

Dans la formule classique :

$$\rho t = \rho_0 (1 + \alpha t + \beta t^2),$$

le coefficient α varie, pour l'aluminium, avec la teneur en impuretés entre 0,0040 et 0,0046. Le coefficient β a pour valeur 0,000004; il est donc négligeable dans les mesures et calculs industriels.

Températures de fusion et de volatilisation. — L'aluminium fond vers 630°. Cependant, cette température, assez difficile à déterminer, varie aussi avec la pureté et la nature du métal.

D'après Day et Sosmann, le point de fusion de l'aluminium serait de 658° ; cette détermination, faite au laboratoire de l'Institut Carnegie de Washington, a été effectuée dans une atmosphère d'azote à l'aide d'un couple platine-rhodium et rapportée au thermomètre à azote.

D'après Kohn-Abrest, le point de fusion varierait entre 625 et 650° (aluminium industriel préparé au four électrique) ; dans ses expériences, il a fait usage de lames d'aluminium très minces que l'on introduisait dans des nacelles de porcelaine placées au milieu d'un tube chauffé électriquement. La lame était recourbée à angle droit. En regardant suivant l'axe du four, on saisissait le moment où la partie droite de la lame s'affaisse ; cet affaissement n'est pas complet, comme il arrive avec l'or et l'argent, car l'aluminium ne fond pas entièrement; la matière fondue est toujours recouverte d'une carcasse plus ou moins oxydée qui rend difficile l'observation exacte du point de fusion.

Chauffé au-dessous de sa température de fusion, l'aluminium devient plastique et peut être forgé et soudé à lui-même si l'on opère dans des conditions convenables. C'est un métal fixe : il ne se volatilise complètement et rapidement qu'à de très hautes températures telles que celles produites par le four électrique. Si l'on chauffe en effet ce métal pendant cinq minutes environ avec un courant de 250 ampères sous 70 volts, on obtient sur le tube froid de l'appareil une agglomération constituée par une poudre grise ; agitée dans l'eau, elle laisse tomber au fond du verre de petites sphérules de métal. Ces sphères, qui ont l'éclat métallique, dégagent de l'hydrogène par l'action des acides chlorhydrique ou sulfurique. On peut également recueillir sur un carton d'amiante de petites sphères recouvertes d'alumine Al^2O^3 produites par l'oxydation des vapeurs métalliques sortant du four.

Dans le vide, la volatilisation de l'aluminium se produit à partir de 1.100°; elle est influencée par la présence du silicium et du carbone, mais elle est totale en l'absence de ces deux éléments.

Pour se rendre compte de ce fait, on se sert d'aluminium très pur et pour éviter l'action des vapeurs d'aluminium sur les silicates (creusets) et l'action consécutive du silicium mis en liberté sur l'aluminium non volatilisé, on peut se servir de nacelles en alumine placées dans un tube de fer doux. Celui-ci est lui-même introduit dans un tube en porcelaine. Il est ainsi facile de voir que la volatilisation du métal pur commence à 1.100°. La rapidité de la volatilisation augmente considérablement avec la température. En prenant soin d'éviter les causes qui l'empêchent (présence du silicium, du carbone, etc.), on constate qu'elle est totale au bout de 30 heures à 1.200°; elle ne l'est pas, même après 73 heures, à 1.100°. En élevant la température, on arrive à activer la volatilisation de l'aluminium dans le vide et on se rapproche des résultats obtenus par Moissan, qui a réussi à distiller à l'air ce métal au bout de quelques instants en le chauffant dans l'arc électrique. Mais on ne produit qu'une volatilisation d'environ 40 °/₀ de la substance en 20 heures et à 1.100°; le reste est beaucoup plus difficile à volatiliser.

A l'état liquide, l'aluminium se prête très bien à l'obtention des

pièces de fonderie par coulée et moulage, comme nous le verrons plus loin (V. *Fusion de l'aluminium*, p. 69).

Dureté. — Tournage et perforage de l'aluminium. — L'aluminium possède une certaine dureté scléroscopique qui, jointe à sa propriété de ne pas se laisser rayer par des matières plus dures que lui (1), rend parfois son travail difficile. C'est ainsi que pour le tourner, il faut faire usage d'un outil très tranchant, en ayant soin de réserver un espace suffisant pour l'évacuation des tournures; la pièce d'acier doit tourner avec une très grande rapidité combinée avec un avancement lent; il est de plus nécessaire d'employer une grande quantité de lubrifiant, eau de savon ou paraffine.

On perfore ce métal à l'aide d'un foret à diamant ayant un jeu suffisant; une mèche hélicoïdale pourrait gripper. Les filets de vis peuvent être obtenus au taraud ordinaire; on graisse avec un peu d'huile légère.

Examiné au microscope, l'aluminium offre une structure intérieure à grains très fins d'un blanc mat. Par le frottement, il devient plus homogène, plus lisse et adhère aisément à l'acier. Aussi a-t-il été utilisé avec succès pour l'aiguisage des lames d'acier; celles-ci prennent rapidement un fil très fin comparable à celui que donnent les meilleures pierres.

Pour la gravure du métal, le burin glissant à sa surface au lieu de l'entamer, on humecte cette dernière avec un mélange de quatre parties d'essence de térébenthine et une partie d'acide stéarique; ce dernier peut être remplacé par de l'huile d'olive.

La dureté Brinell de l'aluminium varie avec le traitement. Nous donnons ci-dessous les résultats d'un essai effectué sur un aluminium de première qualité contenant 99,69 % Al, 0,15 % Si, 0,11 % Cr et 0,05 % Fe. Les expériences ont été faites avec une bille de 1 millimètre, sous une pression de 5 kilogrammes. Les recuits ont été prolongés à chaque température pendant 5 minutes. On a obtenu les chiffres suivants :

(1) Certaines matières très dures glissent sur sa surface comme s'il était recouvert d'un enduit huileux. Cette particularité doit sans doute être attribuée à la fine cohésion des molécules de métal très petites et très serrées les unes contre les autres.

Traitement			Dureté H.
Aluminium fondu			23,7
—	écroui à refus		38
—	recuit à 250°		38
—	—	340°	38
—	—	350°	29
—	—	360°	20
—	—	400°	18

La disparition de l'écrouissage se produit principalement entre 350 et 400°. On voit que l'aluminium recuit est plus mou que le même métal primitivement fondu

Ductilité et malléabilité. — La *ductilité* de l'aluminium est très grande : elle le place immédiatement après l'or, l'argent et le platine. Il en est de même de sa *malléabilité* qui n'est surpassée que par celle de l'or et de l'argent. Par suite, ce métal peut être tréfilé et laminé avec facilité. Les procédés employés sont à peu près identiques à ceux utilisés pour le cuivre. La billette est d'abord laminée à chaud (300° environ), puis réduite par tréfilage à la dimension voulue. La graisse froide est alors employée comme lubrifiant, tandis qu'on se sert de paraffine pour la fabrication des fils très fins à la filière. Des fils de 30 dixièmes de diamètre peuvent être obtenus de cette façon et remplacer ceux de cuivre, de laiton ou de maillechort dans toutes leurs applications.

On fabrique également des profilés, des ronds et des tubes en aluminium, à une température voisine de 80°, en utilisant la presse hydraulique. L'aluminium doux en feuilles peut être étiré, estampé ou forgé à la presse sous différentes formes; comme lubrifiant on emploie l'huile de noix de coco.

Ténacité et élasticité. — La *ténacité* ou *résistance à la rupture* de l'aluminium varie, dans une large mesure, suivant la méthode de traitement adoptée. La température du recuit et l'écrouissage, en particulier, ont une grande influence. Ainsi, pour un fil écroui dont la tension de rupture à 0° est de 18^{kg},7, la nouvelle tension de rupture tombe aux valeurs suivantes :

13kg,00	avec un recuit de	150°
7 ,68	—	250
5 ,76	—	300
2 ,4	—	400

L'aluminium recuit, soumis à un nouveau travail de laminage et de martelage, s'écrouit de nouveau et regagne une partie de sa ténacité initiale. C'est ainsi qu'on peut rendre aux soudures destinées à subir certains efforts mécaniques la résistance que l'échauffement leur a fait perdre.

L'aluminium *coulé* a une résistance à la rupture ne dépassant pas 12 à 15 kilogrammes et un allongement après rupture de 4 à 5 %; mais, sous l'action du laminage ou du tréfilage, il s'écrouit sensiblement et cette résistance monte à 18 kilogrammes et 25 kilogrammes suivant le diamètre; l'allongement après rupture est alors compris entre 2 et 4 %. Voici du reste quelques chiffres se rapportant à l'allongement pour des aluminiums traités différemment :

	Allongement.
Moulages au sable	25 %
Moulages en coquille	35
Barres laminées	35
Tôles laminées	26
Profilés	20
Fils étirés à froid	25
Fils étirés à chaud	30

D'une façon générale, on admet que la ténacité de l'aluminium est la moitié de celle du cuivre, soit, sur fil écroui, de 22 kilogrammes au lieu de 44 kilogrammes pour le cuivre. Cette infériorité n'empêche pas l'aluminium d'offrir pratiquement la même sécurité que le cuivre comme conducteur électrique; elle est en effet largement compensée par sa plus grande chaleur spécifique et la plus grande surface de rayonnement qu'il présente à égalité de densité de courant (v. p. 90).

II. — Soudure de l'aluminium.

Difficultés que présente la soudure de l'aluminium. — Qu'il s'agisse de soudure *autogène* ou de soudure *allogène*, c'est-à-dire constituée dans ce dernier cas par des alliages dans lesquels n'entre pas toujours l'aluminium, la soudure de ce métal n'est pas exempte de difficultés. Ces dernières, que nous allons examiner succinctement, tiennent à la fois des propriétés physiques, mécaniques et chimiques de l'aluminium.

a) *Formation d'alumine.* — Le principal obstacle à la soudure de l'aluminium par les procédés ordinaires est la formation d'alumine, Al^2O^3, qui résulte de la simple exposition à l'air du métal fondu. Il est dès lors impossible d'unir deux lames composées d'aluminium sans chercher à détruire d'abord l'alumine formée ; celle-ci peut même se produire à l'état de paillettes très longues, quoique fines, qu'il est difficile d'éliminer si elles viennent à se répartir dans le métal fondu. Cela est du reste d'autant plus à craindre que la densité de l'aluminium n'est que de 2,6, alors que celle de l'alumine est de 3,75, parfois même de 3,90 à température élevée.

En outre, l'alumine fond à peu près à 3.000°, tandis que l'aluminium fond à 650° environ.

Quelle que soit la chauffe, l'alumine se reforme sans cesse et tous les moyens mécaniques tentés pour l'éliminer de la masse métallique sont sans résultat ; ils le sont d'autant moins que, de tous les oxydes, l'alumine est celui qui s'incorpore le plus volontiers aux métaux au lieu de chercher à s'isoler sous forme d'une mince pellicule à leur surface. Cette pellicule d'oxyde empêche la liaison complète de deux plaques d'aluminium chauffées à la température de fusion. C'est donc uniquement par voie chimique, c'est-à-dire par l'emploi d'un fondant convenablement choisi, qu'on peut arriver à dissoudre l'alumine ; et, en fait, sans cette précaution, aucune bonne soudure n'est possible avec l'aluminium. Les meilleurs fondants sont à base de chlorures et fluorures de métaux alcalins et alcalino-terreux (V. p. 45).

b) *Élimination difficile des impuretés.* — Une autre difficulté de la soudure de l'aluminium est l'élimination difficile de ses impuretés et notamment du fer et du silicium qu'il contient toujours en petite quantité (fer, 1,25 %; silicium, 0,65 %). Les gaz occlus (azote, hydrogène) ne présentent pas un grave inconvénient alors même qu'ils se dégageraient au sein même de la soudure, pourvu toutefois qu'ils ne soient pas en quantité suffisante pour rendre le métal poreux, ce qui lui enlèverait toute cohésion. Le fer et le silicium, au contraire, en s'unissant à l'aluminium, forment avec ce métal des alliages volumineux, très fragiles et très durs. Pendant la solidification de l'ensemble, ces alliages s'isolent dans le joint des cellules et peuvent, en quantité suffisante, constituer un réseau ininterrompu autour des grains de métal. Le réseau intercristallin ainsi formé est extrêmement fragile et facilite les cassures sous l'influence de chocs même très légers.

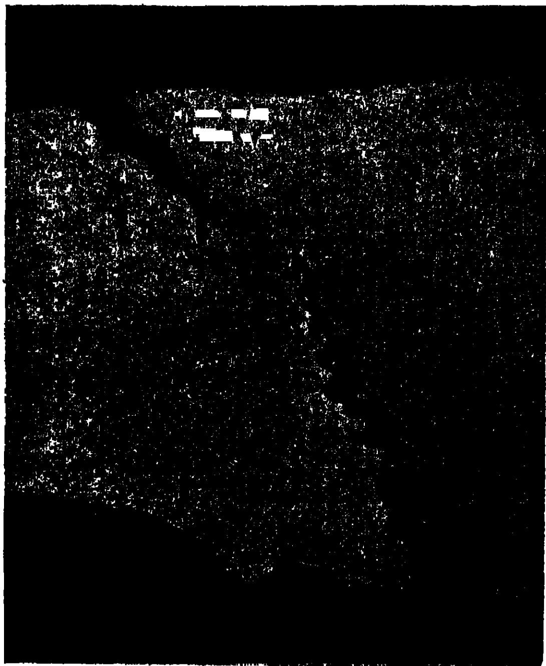


Fig. 6. — Fracture d'une soudure de tôle d'aluminium (à la suite d'une surchauffe) due aux impuretés du métal : fer, silicium. — Gross. : 50 diam. Polissage en bas-relief. (D'après R. Amédéo.)

La figure 6 permet de se rendre compte de ce phénomène. Elle représente une soudure d'aluminium, grossie à 50 diamètres, après simple polissage en bas-relief. Le métal est constitué dans toute la partie comprenant la cassure par des grains d'aluminium

entourés d'un réseau volumineux visible sans aucune attaque. L'examen des environs de la cassure montre que les lignes de rupture contournant les joints des cellules se propagent jusque dans l'alliage fer-aluminium-silicium formé aux dépens des impuretés du métal. D'après M. Amédéo, il ne se forme un réseau d'impuretés, c'est-à-dire fragile, que dans la portion du métal portée par le chalumeau à la température de fusion pendant l'exécution de la soudure. Le métal d'apport constitué par de l'aluminium pur ne présente aucun réseau semblable.

Il est donc nécessaire pour la fabrication d'objets en aluminium formés de plusieurs pièces réunies par soudure, de posséder un métal aussi pur que possible ; les corps étrangers, en se séparant pendant la solidification des bords de la soudure, créent des lignes de rupture. On a constaté cependant qu'un étirage modéré suivi d'un recuit à la température du bois fumant est susceptible d'améliorer les propriétés des soudures d'aluminium rendues ainsi fragiles.

c) *Coefficient de dilatation élevé.* — L'aluminium présente, au point de vue de sa soudure, un troisième inconvénient : un coefficient de dilatation élevé. Comme, en outre, sa ténacité est faible à chaud, il peut en résulter des ruptures de métal au cours du refroidissement sous l'influence du retrait. Il est donc indispensable, avant chaque opération de soudure, de prévoir ces phénomènes et d'évaluer approximativement leur intensité d'après la forme, les dimensions et la position réciproque des pièces à souder. Un chauffage préalable à 300 ou 400° dans un four spécial ou à l'aide d'un chalumeau est donc souvent nécessaire. On peut également rendre libres la dilatation ou le retrait de certaines régions du métal par des traits de scie judicieusement répartis et qui limitent ainsi l'effet de la chauffe préalable.

Cet inconvénient du coefficient de dilatation élevé de l'aluminium est en partie annulé par sa grande conductibilité calorifique, qui tend à répartir rapidement et uniformément la chaleur dans toute la masse de métal.

d) *Point de fusion peu élevé.* — Le point de fusion assez bas de l'aluminium, 650°, est aussi un inconvénient pour sa soudure,

étant donné, d'une part, la température que fournissent la plupart des chalumeaux même peu poussés et, d'autre part, la friabilité de l'aluminium au voisinage de son point de fusion. Comme, par contre, il est très fluide une fois fondu, de grandes précautions sont nécessaires pendant l'exécution des soudures pour éviter à la fois des trous résultant de la fusion rapide du métal et des ruptures par dilatations inégales.

e) *Alliages difficiles de l'aluminium avec les métaux soudeurs.* — L'aluminium ne fait pas un alliage rapide avec les soudures habituelles à une température aussi basse que les autres métaux. Pour le souder, il faut donc opérer à une température assez élevée, ce qui se traduit par les inconvénients signalés plus haut. Enfin l'aluminium ne s'allie avec le plomb qu'avec une grande difficulté, ce qui lui rend peu applicables les soudures renfermant une forte proportion de ce métal.

Ces différents inconvénients militent en faveur de la soudure autogène de l'aluminium qui conduit toujours à d'excellents résultats lorsqu'elle est exécutée avec soin et d'après les particularités relatives à l'épaisseur et à la forme des pièces à souder ; elle évite notamment la corrosion plus ou moins rapide du métal sous l'action des liquides acides ; on sait en effet que toute soudure hétérogène entraîne, par la seule présence de l'aluminium et d'un liquide salin ou acide, la formation d'un couple voltaïque qui amène la destruction partielle du métal par dissolution progressive et formation de trous, piqûres, etc. Cette action est d'autant plus vive que le métal principal de la soudure est plus éloigné de l'aluminium dans l'échelle électrochimique des métaux.

Exécution des soudures. — *Flux décapant.* — La première opération, dans l'exécution de la soudure, est l'emploi d'un fondant ou flux décapant convenable. Ce fondant, destiné à éliminer l'alumine, doit répondre aux conditions suivantes :

1° Être plus fusible que l'aluminium, de manière à éviter les trous dans le métal sous l'influence d'une flamme trop chaude ;

2° Posséder, une fois fondu, une densité assez faible pour écarter toute chance d'interposition dans le métal fondu à son contact ;



Fig. 7. — Échantillon prelevé dans une soudure aluminium-zinc faite sans poudre décapante : nombreux amas d'alumine. — Gross. : 100 diam.



Fig. 8. — Échantillon prélevé dans une soudure aluminium-zinc faite avec poudre décapante : traces d'alumine. — Gross. : 100 diam.

3° Ne pas être fluide, mais posséder au contraire une viscosité suffisante pour ne pas s'écarter de la ligne de soudure et former à la surface du métal fondu une couche protectrice ininterrompue; cela évite une réoxydation locale des parties métalliques primitivement décapées;

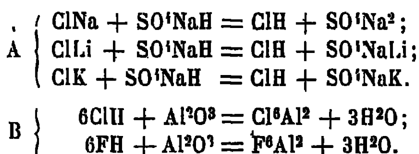
4° Assurer la destruction complète de l'alumine, soit par dissolution, soit par la formation de composés nouveaux faciles à éliminer ensuite de la surface du métal.

Le composé résultant de la combinaison de l'oxyde d'aluminium et de l'agent décapant doit ainsi être lui-même très fusible, peu dense et même, si possible, volatil pour éviter toute interposition de matière à l'intérieur de la soudure ou du métal avoisinant.

On a essayé un grand nombre de corps et de mélanges de sels pour arriver à un résultat favorable. Après bien des tentatives infructueuses, l'Union de la soudure autogène a adopté un mélange de chlorures alcalins, de fluorure de potassium et de bisulfate de soude répondant aux pourcentages suivants :

Chlorure de lithium........................	15 %
Chlorure de potassium........................	45
Chlorure de sodium........................	30
Fluorure de potassium........................	7
Bisulfate de soude........................	3

Sous l'influence de la chaleur, le bisulfate décompose les chlorures et le fluorure avec dégagement d'acides chlorhydrique et fluorhydrique. Ces derniers attaquent l'alumine avec une grande énergie et formation de chlorure et de fluorure d'aluminium, composés volatils. Ces réactions prennent naissance conformément aux équations chimiques suivantes :



$$A \begin{cases} ClNa + SO^4NaH = ClH + SO^4Na^2; \\ ClLi + SO^4NaH = ClH + SO^4NaLi; \\ ClK + SO^4NaH = ClH + SO^4NaK. \end{cases}$$

$$B \begin{cases} 6ClH + Al^2O^3 = Cl^6Al^2 + 3H^2O; \\ 6FH + Al^2O^3 = F^6Al^2 + 3H^2O. \end{cases}$$

La préparation du mélange des différents sels exige certaines précautions. Elle est assez délicate, les sels devant d'abord être soi-

gneusement desséchés à l'étuve, puis mélangés de façon à éviter toute combinaison entre eux. Il est préférable de laisser aux spécialistes le soin de cette préparation. La pratique démontre que toute poudre décapante qui *grésille* sous l'action du chalumeau est de fabrication défectueuse.

L'utilité d'une poudre décapante pour la soudure de l'aluminium se démontre par nombre de faits et essais malheureux résultant de son absence. Dans ce dernier cas, les lignes ou surfaces soudées ont des portions simplement collées qu'un simple choc suffit souvent à séparer.

L'examen micrographique de soudures réalisées avec et sans flux décapant permet, peut-être encore mieux, de se rendre compte de l'utilité de ce dernier d'après la proportion d'alumine restée dans le métal de soudure après son exécution. La figure 7 représente, d'après M. Amédéo, un échantillon prélevé dans une soudure d'alliage aluminium-zinc ayant réuni deux plaques de ce même alliage sans emploi de poudre décapante. Les amas d'alumine y sont nombreux, les paillettes ont une grande longueur et, en se réunissant par groupes, forment des réseaux compromettant sérieusement la résistance de l'alliage. Si l'on examine maintenant la figure 8, représentant la même soudure, mais avec emploi de poudre décapante, on n'aperçoit que des traces très faibles d'alumine. Au point de vue mécanique, l'alliage est plus souple et plus résistant que le précédent.

On a même constaté que, souvent, l'alliage soudant est plus résistant que les plaques d'alliage soudé. Cela provient de ce que, dans la fabrication des moulages en alliages d'aluminium, on coule généralement ces derniers sans ajouter de fondant au creuset; l'alumine formée au cours de la fusion ne peut s'éliminer et se répand dans l'alliage. Au point de vue qui nous occupe, on peut dire que, souvent, une pièce soudée avec flux décapant est plus solide après réparation ou soudure que ses différentes parties ou que la pièce neuve.

Mode opératoire. — Le flux décapant s'emploie généralement en trempant dans le flacon qui le contient l'extrémité de la tige du métal d'apport. Celui-ci est constitué par de l'aluminium pur dans

le cas de la soudure de pièces formées de ce métal et, généralement, par des alliages d'aluminium et des métaux constituant les pièces à souder lorsqu'on traite des alliages d'aluminium.

Au début de l'opération, on chauffe l'extrémité de la tige du métal d'apport au chalumeau pour que la poudre adhère, tout en évitant une dose exagérée. La puissance du chalumeau à employer varie naturellement avec l'épaisseur de métal à souder. Dans le cas de l'utilisation du chalumeau à acétylène (flamme oxy-acétylénique), on emploiera les débits suivants :

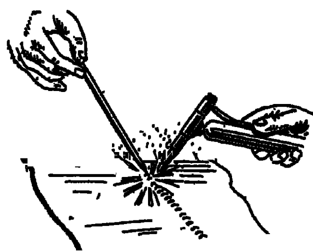
	Débit d'acétylène à l'heure.
Tôles de 1 millim. à $1^{mm},5$	50 à 60 litres
— 2 —	120
— 3 —	225 à 250
— 5 —	500

Si les pièces à souder étaient préalablement chauffées en vue de supprimer les effets de dilatation et de retrait dont il a été question plus haut, il ne serait pas nécessaire d'utiliser des débits aussi importants.



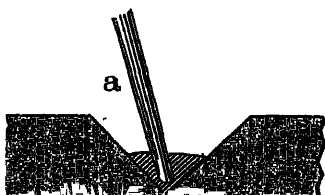
FIG. 9. — Soudure de tôles très minces d'aluminium.

Pour la soudure des tôles très minces, il n'est pas indispensable de faire usage du métal d'apport; il suffit, comme le montre la figure 9, d'agrafer les bords de la soudure (*b*) ou de les relever (*a*). Pour les soudures ayant deux ou trois millimètres d'épaisseur, le métal d'apport (*fig.* 10) doit être tenu en avant du chalumeau dans la direction des bords à souder. Au moment où commence la fusion de ces derniers, on le chauffe rapidement ; il s'affaisse alors pour former un seul bain de fusion avec le métal des pièces à réunir.


FIG. 10. — Tenue du métal d'apport et du chalumeau pour la soudure des tôles d'aluminium minces.

Pour la soudure des pièces épaisses, les bords à réunir doivent être bien grattés à vif ; un chanfrein est utile à partir de trois millimètres d'épaisseur (*fig.* 11).

Le métal d'apport *a*, préalablement chauffé et poudré, est fondu ans le bain de fusion du chanfrein. La vitesse d'avancement n'est as régulière. La première amorce de fusion est relativement longue ar suite de la perte de chaleur par conductibilité. A mesure que les bords de la soudure s'échauffent, l'opération devient de plus en plus rapide. Il faut alors localiser le plus possible la chaleur le long de la ligne de soudure pour éviter la fusion et l'affaissement des parties environnantes.



ıG. 11. — Soudure autogène de pièces épaisses d'aluminium. (*a*, métal d'apport.)

D'après Granjon et Rosemberg, il convient d'éviter le contact du dard du chalumeau avec le métal prêt à fondre ou déjà fondu, car ı haute température de cette partie de la flamme entraînerait la ›rmation de trous difficiles à boucher. L'écartement du dard varie ıtre 5 et 20 millimètres, suivant la puissance du chalumeau.

Il est impossible de donner des renseignements très précis, car épaisseur du métal, l'importance et la forme des pièces à réunir uent un grand rôle dans l'exécution pratique des soudures. En ıtre, une certaine pratique est nécessaire pour obtenir des lignes



FIG. 12. — Soudure d'aluminium effectuée avec un fil d'apport trop gros.

e soudure régulières et d'un bel aspect. C'est ainsi que l'emploi 'un fil d'apport trop gros produit un bourrelet superficiel (*fig.* 12) . un manque de pénétration ; l'usinage d'une telle soudure est inutilement coûteux. L'emploi d'un chalumeau trop puissant empêche . progression normale du travail ; d'où trous, affaissements et col-

lages (*fig.* 13). Dans une très bonne soudure (*fig.* 14), le métal est disposé régulièrement par plages formant dans leur ensemble une bande recouvrant les bords de métal et sans épaisseur exagérée.

Lorsque la soudure est terminée, on la laisse se refroidir lente-



Fig. 13. — Soudure d'aluminium effectuée par l'emploi d'un chalumeau trop puissant.

ment, puis on la frotte avec une brosse dure et sous l'eau courante, de façon à éliminer les sels qui pourraient peu à peu corroder le métal et qui ont pris naissance par l'apport du flux décapant. Lorsque les pièces ont une forme qui s'y prête, on peut ensuite les marteler légèrement à froid de façon à leur donner la texture et l'aspect extérieur du métal laminé. Un léger recuit fait disparaître l'écrouissage.



Fig. 14. — Soudure d'aluminium normale.

La soudure par recouvrement, qui donne d'excellents résultats avec certains métaux (tôles de fer et d'acier extra-doux), ne peut convenir à l'aluminium. On sait que dans ce procédé, la préparation des pièces se fait comme s'il s'agissait d'une soudure à la forme; les bords des tôles constituent des amorces qui se recouvrent; la ligne à souder est chauffée par petites portions au moyen d'un chalumeau et, quand la température soudante est atteinte, on martèle pour opérer la liaison des bords. Quelles que soient les précautions prises pour éviter, avec

l'aluminium, la formation d'alumine pendant le chauffage au chalumeau, il se produit généralement une couche plus ou moins épaisse de cet oxyde ; si l'on impose après refroidissement à la partie soudée une flexion par choc, on obtient toujours le décollement des amorces pour un angle de pliage à peine inférieur à 180°.

Alliages pour soudures. — Il existe actuellement dans le commerce des alliages spéciaux pour soudure de l'aluminium dont la composition est très variable.

Lorsque cette dernière est à peu près la même que celle de l'alliage constituant les pièces à unir ou à réparer, ils donnent des résultats satisfaisants ; mais il en est rarement ainsi, et la soudure, incontestablement hétérogène, est généralement très altérable à l'air et peu résistante. C'est le cas de la suivante destinée, d'après l'inventeur, à la réparation des carters d'aluminium pour automobile :

Cuivre	10 %
Plomb	0,5
Zinc	89
Fer, antimoine, cadmium	0,5

Il n'y a pas trace d'aluminium dans cet alliage d'apport et le zinc y existe, par contre, en proportion très exagérée.

L'*étamage* de l'aluminium donne, par contre, de bons résultats quoiqu'il soit un peu compliqué en pratique. On peut opérer de différentes façons. Dans le procédé Melsen, les pièces sont d'abord décapées à l'acide sulfurique étendu, lavées à l'eau, plongées dans une solution de soude à 10 %, puis dans le bain suivant :

Sulfate de nickel	40
Chlorure d'ammonium	20
Acide citrique	2
Eau	1.000

Elles se recouvrent ainsi d'une légère couche de nickel. Le dépôt d'étain est obtenu en les plongeant dans un second bain composé ainsi qu'il suit :

Chlorure d'étain	2
Pyrophosphate de soude	20
Eau	1.000

Sitôt le dépôt d'étain réalisé, ou peut souder d'après les procédés habituels.

Dans le procédé Mallet et Westinghouse, on met à profit la réaction :



$$3Cl^2Sn + 2Al = 2Cl^3Al + 3Sn.$$

Le chlorure stanneux Cl^2Sn est d'abord fondu pour le priver de son eau et coulé en petits bâtons. On passe un de ces bâtons sur l'aluminium chaud ; le composé fond et il se forme, outre le chlorure volatil Cl^3Al, un alliage d'aluminium et d'étain qui se laisse facilement étamer et souder. On peut simplifier l'opération en saupoudrant les parties à réunir d'un peu de chlorure stanneux et en chauffant jusqu'à complète disparition des fumées blanches de chlorure d'aluminium.

Soudure des alliages d'aluminium. — La soudure des alliages d'aluminium présente le même intérêt que celle de l'aluminium en raison de leurs nombreuses applications industrielles. Comme il a été dit plus haut, il faut en général, comme métal d'apport, employer une composition de même teneur que les pièces à souder. Cependant, ces alliages offrant des combinaisons très variées, il faut prendre soin de ne pas utiliser une flamme trop chaude qui provoquerait des affaissements aux points de plus faible fusion.

La soudure des principaux alliages d'aluminium sera étudiée pour chaque alliage isolément. Voir notamment : BRONZES D'ALUMINIUM, ALLIAGES ZINC-ALUMINIUM, DURALUMINIUM.

Soudure électrothermique. — La soudure électrothermique de l'aluminium est parfaitement possible lorsqu'on possède l'outillage nécessaire. Elle présente l'avantage d'être très rapide et de donner de bons résultats. Les pièces à souder, fixées dans des mâchoires en relation avec les bornes du courant, sont mises en contact après avoir été saupoudrées de flux décapant. Si l'on se sert de courant continu, l'alumine est électrolysée au fur et à mesure de sa dissolution dans le mélange décapant, par un mécanisme analogue à celui qui donne naissance à l'aluminium dans l'extraction de ce métal ; elle repasse à l'état d'aluminium métallique et, au lieu d'être un obstacle à la réalisation d'une bonne soudure, elle

aide ainsi à sa parfaite exécution. Le métal d'apport n'est pas essentiel, les bords des pièces à souder entrant en fusion par le seul passage du courant.

L'inconvénient de cette méthode est d'exiger une installation assez coûteuse et une grande habitude de la part des soudeurs pour éviter des intensités de courant exagérées qui feraient couler le métal au lieu de réunir les pièces à souder, mais on a eu raison de ces difficultés par la pratique. Il en est de même de la formation d'alumine. Autrefois, cette substance, qui est un isolant, empêchait les surfaces métalliques de se souder. Avec les machines à résistance dans lesquelles intervient la pression des pièces l'une contre l'autre, la couche d'oxyde est rompue et poussée de côté; elle laisse ainsi les surfaces de métal venir en contact et se souder.

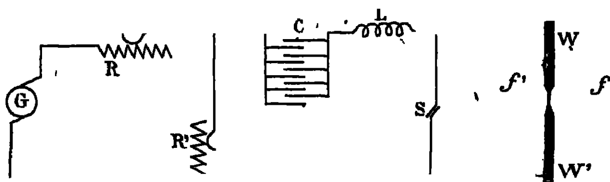


Fig. 15. — Soudure électrothermique des fils d'aluminium dispositif de l'installation.

Le procédé Skinner et Chubb s'applique surtout à la soudure des *fils d'aluminium* et repose sur la constatation suivante : des fils de cuivre ou d'aluminium se soudent automatiquement aux plaques d'aluminium d'un condensateur électrolytique quand une étincelle jaillit entre les fils et les plaques. Cette soudure est particulièrement résistante au point de vue mécanique, chaque fois que le contact se produit avec choc.

Cette observation permet de réaliser la soudure rapide et économique de la plupart des fils métalliques et donne notamment d'excellents résultats avec ceux en aluminium. L'installation permettant de réaliser cette opération comprend (*fig.* 15) une génératrice à courant continu G qui charge, à travers une résistance R, un condensateur électrolytique C, aux bornes duquel on peut faire varier la tension à l'aide d'un rhéostat R'. Le circuit du condensateur contient une self-induction L, un interrupteur à ressort S et,

en parallèle avec ce dernier, deux pinces à fil W et W', sortes d'électrodes dont l'une W' est fixe ; l'autre W peut en être brusquement rapprochée jusqu'au contact.

Les fils à souder f et f' sont pris dans ces pinces, puis coupés au ras de leur point d'insertion à l'aide d'une pince coupante, de façon que les arêtes des sections de ces deux fils soient dirigées à peu près à l'angle droit l'une sur l'autre.

Pour effectuer la soudure de ces fils, on fait d'abord fonctionner la génératrice G en maintenant fermé l'interrupteur S ; puis, après avoir mis les fils f et f' en place dans les pinces, on ouvre cet interrupteur et on déclanche la pince W de façon à amener les deux fils en contact. La soudure est instantanée et sa résistance mécanique est égale à celle du reste du fil. La self-induction L, introduite dans le circuit de C, a pour fonction d'abaisser la fréquence de la décharge oscillante se produisant entre les fils à souder au moment où le contact va se produire, et d'empêcher que l'arc jaillissant entre leurs extrémités soit éteint avant leur contact final ; cela rendrait impossible, en effet, une soudure complète des fils en présence.

Ce procédé de soudure a été désigné sous le nom de *soudure par choc électrique*. Pour souder deux fils d'aluminium de 1 millimètre environ de diamètre, avec une tension initiale de 210 volts, l'intensité atteint jusqu'à 500 ampères ; mais, comme la durée de passage n'est guère que de 0,0012 seconde, la consommation effective de courant est insignifiante. Il est également utilisable à la soudure des fils d'acier, de cuivre, de laiton, etc., dont l'élévation de température modifie ordinairement sa structure intérieure. Les résultats sont parfaits quant à la conservation des qualités des métaux soudés, l'échauffement restant localisé aux points de soudure et l'opération étant très rapide.

Applications diverses. — La soudure autogène de l'aluminium et de ses alliages s'est considérablement développée dans ces dernières années. Non seulement elle sert à réparer les pièces brisées, mais elle est appliquée d'une façon courante pour la confection, par assemblage, de nombreux objets usuels : bouteilles et bidons légers, récipients de grandes dimensions, etc. On l'emploie aussi

pour le raboutage des fils, câbles et barres électriques, la fixation de viroles, l'assemblage des pièces d'aéroplanes, la fabrication de nombreuses pièces de machines et d'outillage.

III. — Propriétés chimiques.

Action des acides et de l'eau. — Les propriétés chimiques de l'aluminium varient suivant qu'il est pur ou qu'il renferme des matières étrangères ou d'autres métaux; elles sont modifiées en outre par l'état physique du métal : aluminium en lingot, en lames minces, en poudre, etc.

Parmi les acides, l'*acide chlorhydrique* est celui qui exerce l'action la plus vive, car il dissout facilement l'aluminium à froid. Les solutions d'*alcalis* (potasse, soude), libres ou carbonatés, l'attaquent rapidement en donnant des aluminates alcalins solubles; il en résulte que, pour le nettoyage courant des objets et ustensiles de ménage en aluminium, l'emploi des cristaux de soude et des savons très alcalins doit être prohibé.

Dans l'*eau pure* distillée ou potable, à froid et à chaud, l'aluminium pur est pratiquement inaltérable; de même, les *acides nitrique*, *sulfurique* et *acétique* ne l'attaquent pas sensiblement à froid, mais à chaud les deux premiers acides exercent une attaque sensible sur le métal commercial. S'il n'est pas pur, il risque de perdre une grande partie de sa résistance aux agents chimiques et de se corroder au contact de l'air et de l'eau. La corrosion de ce métal en contact avec l'eau pure, l'*eau acide* ou la vapeur d'eau, en présence de métaux étrangers (cuivre notamment) ou d'impuretés (fer, silicium, sodium) est due à un phénomène d'électrolyse au cours duquel l'aluminium; qui dans le cas du cuivre est électropositif par rapport à ce métal, s'ionise plus ou moins rapidement. Il se forme donc un couple et l'action, c'est-à-dire l'attaque de l'aluminium, est d'autant plus vive et plus rapide qu'il est plus chargé d'impuretés ou que l'électrolyte est plus acide.

En ce qui concerne l'action de l'*eau* sur le métal commercial préparé au four électrique, elle est faible, mais cependant sensible : c'est du reste en attaquant par de l'eau une lame d'aluminium que

l'on dose le sodium qu'il renferme. La poudre de ce métal est encore plus attaquable, ainsi que l'a démontré Kohn-Abrest; mais l'action ne se produit que si l'on a chauffé le mélange ; une fois amorcée, elle est extrêmement violente et donne lieu à un dégagement d'hydrogène important ; il se forme des oxydes d'aluminium hydratés.

Action de l'oxygène et de l'air. — L'oxygène exerce une action des plus irrégulières. En effet, tandis qu'à l'état de métal compact l'aluminium n'est attaqué que très superficiellement lorsqu'on le chauffe dans l'air ou même dans l'oxygène, il n'en est plus de même de la poudre d'aluminium (V. p. 102). Cette dernière renferme toujours un oxyde dû à l'oxydation partielle du métal à l'air, à la température ordinaire. Mais l'augmentation de poids de l'aluminium chauffé à l'air n'est pas due seulement à la fixation d'oxygène ; l'azote intervient également, l'absorption de ce gaz étant dans certains cas très importante. En chauffant de la poudre d'aluminium à 600° dans l'air, Kohn-Abrest a constaté qu'elle s'oxyde partiellement sans fixation d'azote et que l'oxydation atteint rapidement sa limite ; à 800° et au-dessus, l'azote et l'oxygène se fixent simultanément sur le métal jusqu'à ce qu'il ait complètement disparu.

L'inaltérabilité apparente de l'aluminium à l'air est due en réalité à la formation d'une pellicule mince, continue et imperméable d'alumine. Cette pellicule, en outre très adhérente et se reformant dès que le métal est mis à nu, protège ce dernier contre toute oxydation ultérieure. C'est grâce à la présence constante de cette couche d'alumine que l'on peut soumettre, sans oxydation notable, un lingot d'aluminium, à la température du chalumeau oxhydrique. A l'état divisé, on réussit très bien, au contraire, comme nous l'indiquons plus loin (V. ALUMINOTHERMIE, p. 77), à le faire brûler dans l'oxygène et même dans l'air. De tous les éléments, l'aluminium est le métal qui, en se combinant à l'oxygène, dégage la plus grande quantité de chaleur, soit 380 calories.

Les causes véritables de l'altérabilité de l'aluminium ne sont du reste pas entièrement connues, la corrosion et la désintégration de ce métal étant dues à un assez grand nombre de facteurs parmi

lesquels il faut comprendre, outre les actions chimiques et électrochimiques lentes, l'état moléculaire et les traitements mécaniques subis par le métal (V. p. 62).

L'aluminium agit comme réducteur dans un grand nombre de cas, réduit au rouge blanc l'anhydride borique, la silice, de nombreux oxydes ; il s'unit à la plupart des métaux en formant des alliages dont quelques-uns ont reçu d'importantes applications (V. *Alliages*, p. 119 et suiv.).

Enfin, chauffé au-dessous du rouge dans un mélange de chlore et d'oxygène, il devient incandescent et se délite en donnant naissance à des lamelles d'oxychlorure d'aluminium. Avec le carbone et l'azote, il forme des carbures et azotures d'aluminium (Voir p. 253 et suiv.).

Principales impuretés de l'aluminium industriel. — Les principales impuretés que l'on rencontre dans l'aluminium industriel sont le *fer*, le *silicium*, la *silice*, le *carbone*, l'*azote*, le *sodium*, le *cuivre*, le *titane* et le *bore*. Mais ce sont surtout le fer, le silicium, le carbone et le sodium qui constituent la majeure partie de ces impuretés : le fer provient du minerai, des électrodes et des matières constituant le four ; le silicium a la même origine, mais il est dû particulièrement à l'alumine employée ; le carbone provient naturellement des électrodes et le sodium du minerai, la cryolithe, qui est une fluorure double d'aluminium et de sodium. On obtient couramment aujourd'hui un métal ne renfermant que de faibles quantités de ces différentes impuretés dont la présence modifie toujours, plus ou moins, les propriétés chimiques, mécaniques et électriques de l'aluminium.

Nous donnons ci-dessous la composition d'un échantillon provenant de la *British Aluminium C°* :

Aluminium	99,67 %
Fer	0,21
Silicium	0,12
Sodium	Traces

C'est donc un aluminium industriel très pur.

Une analyse d'échantillons d'aluminium obtenu par les procédés

électrochimiques actuels a donné les résultats moyens suivants :

Fer	0,25 à 0,70 %
Silicium	0,15 à 0,60
Silice	0,30 à 0,50
Carbone	0,20 à 0,30
Azote	0,10 à 0,15
Cuivre	0 à 0,006
Sodium	0 à 0,006
Aluminium (par différence)	99 à 97,738

Voici enfin, d'après M. Kohn-Abrest, l'analyse d'une poudre d'aluminium, soigneusement dégraissée [1] :

Aluminium	95,930 %
Fer	0,613
Silice	0,259
Silicium insoluble	0,418
Carbone total	0,310
Azote	0,152
Sodium	0,006
Cuivre	Néant
Titane	Traces
Aluminium de la partie insoluble dans les acides	0,024
Oxygène (par différence)	2,288

Il résulte de cette dernière analyse que sur 100 grammes de cette poudre, une certaine partie d'aluminium existe à l'état de combinaison avec l'oxygène, ce qui montre bien l'existence d'oxydes d'aluminium préexistants.

Le pourcentage des oxydes d'aluminium, dans les poudres commerciales résultant du battage de feuilles minces (v. p. 102), peut atteindre 5,7 %.

Analyse de l'aluminium. — *Aluminium en plaques, rognures, lingots, etc.* — M. Kohn-Abrest a constaté qu'à des températures relativement basses (300°), le gaz acide chlorhydrique attaque rapidement l'aluminium (plaques, rognures, etc.) préalablement

(1) La quantité de suif ajoutée à la poudre d'aluminium, lors de sa préparation, atteint environ 0,20 à 0,25 %.

chauffé à la même température dans un courant d'hydrogène. Lorsque les proportions de fer sònt faibles (0,5 à 0,6 %), il suffit de maintenir l'attaque pendant vingt-cinq minutes pour que la presque totalité du fer soit volatilisée. Dans ces conditions, le silicium semble se volatiliser à l'état de silicichloroforme, corps très volatil qui est complètement entraîné par le courant gazeux. Le dispositif employé à cet effet est le suivant :

a) Un appareil à hydrogène avec système purifiant et desséchant ;

b) Un appareil producteur de gaz acide chlorhydrique muni d'un système desséchant spécial. Le gaz chlorhydrique est produit

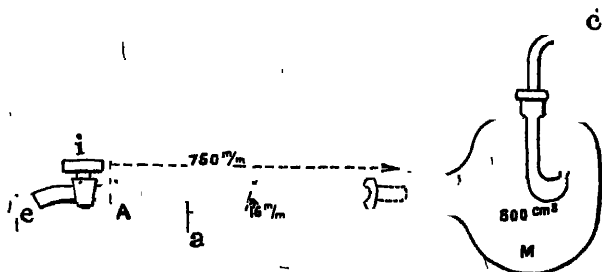


Fig. 16. — Dispositif de Kohn-Abrest pour l'analyse de l'aluminium.

par déplacement en faisant tomber goutte à goutte de l'acide sulfurique dans une solution pure d'acide chlorhydrique modérément chauffée.

Par le jeu d'un robinet à deux voies, on peut envoyer à volonté dans le tube à expérience A (*fig.* 16) l'un ou l'autre de ces deux gaz. La tubulure *c* communique avec un flacon-laveur M de 500 centimètres cubes, bouché à l'émeri. Le tube A est chauffé à partir de 7 à 8 centimètres de son orifice antérieur, en *a*, par une très courte grille à gaz (15 centimètres de longueur) recouverte d'une toile métallique. Un thermomètre est couché entre la toile et le tube.

Après dessiccation de l'appareil, on place l'échantillon d'aluminium dans une nacelle plate en porcelaine qu'on engage dans le tube en *a*. On chauffe à 300° pendant dix minutes dans un courant d'hydrogène, puis on fait passer un courant rapide de gaz chlorhydrique. Il faut refroidir le matras M par un courant d'eau froide

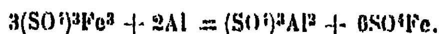
pour diminuer, autant que possible, les condensations de chlorure dans le flacon communiquant avec ce matras. La presque totalité se condense alors dans le tube A.

Après disparition des globules incandescents formés au cours de l'attaque, on arrête le dégagement de gaz chlorhydrique, et on laisse refroidir dans un courant d'hydrogène pour éliminer les dernières traces de gaz chlorhydrique.

Il ne reste plus qu'à dissoudre dans de l'eau le chlorure d'aluminium condensé dans tout l'appareil. Après avoir fermé les robinets du flacon-laveur faisant suite au matras, on remplace le bouchon *i* du tube A par un bouchon traversé par l'extrémité d'un tube coudé à un angle droit, en *e*, et contenant de l'eau distillée. Pour réaliser dans l'appareil un vide partiel, on met pendant un instant le second robinet du flacon faisant suite au matras en communication avec une trompe à eau, on ferme le robinet en communication avec la trompe et l'on ouvre ensuite le robinet communiquant avec le matras. L'eau du tube à ampoule peut ainsi rapidement pénétrer dans l'appareil et le chlorure d'aluminium condensé se trouve dissous sans perte. On dose sur des parties aliquotes du liquide le chlore et le fer : 1 de chlore correspond à 0,529 de fer et à 0,2535 d'aluminium. On peut ainsi doser très rapidement l'aluminium métallique.

Cette méthode s'applique du reste à tous les alliages de l'aluminium avec les métaux donnant au contact du gaz chlorhydrique des chlorures peu volatils, en ne dépassant pas 300° à 350° : aluminium-zinc, aluminium-cadmium, aluminium-magnésium, aluminium-cuivre, aluminium-chrome, aluminium-fer, etc.

Aluminium en poudre. — Lorsqu'il s'agit d'aluminium en poudre, on peut employer un procédé plus simple, basé sur l'action qu'exerce la poudre de ce métal sur le sulfate ferrique. La réaction est la suivante :



$$3(SO^4)^3Fe^2 + 2Al = (SO^4)^3Al^2 + 6SO^4Fe.$$

Une partie de fer équivaut à 0,16156 d'aluminium métallique. On part de $0^{gr},5$ ou 1 gramme de poudre dégraissée par l'éther et séchée dans le vide et on la mélange avec un large excès de sul-

fate ferrique (25 à 30 grammes). Le tout est introduit avec de l'eau dans un ballon qu'on plonge dans de l'eau bouillante. Un courant d'acide carbonique traverse le mélange pendant toute la durée de l'opération. L'attaque commence vers 100° et s'effectue très rapidement, car au bout de 10 minutes tout l'aluminium a disparu et il ne reste plus qu'une solution brune et transparente. On introduit 20 centimètres cubes d'acide sulfurique et ensuite de l'eau. On laisse refroidir la liqueur dans le courant de gaz carbonique et, sur une portion connue de la solution, on effectue le dosage du sel ferreux à l'aide d'une solution de permanganate à $3^{gr},14$ par litre; 1 centimètre cube de cette solution équivaut à $0^{gr},000\ 895$ d'aluminium, à $0^{gr},000\ 0997$ d'hydrogène et à $0^{gr},005\ 55$ de fer.

M. Clennell (1) recommande, pour l'analyse de la poudre d'aluminium, la méthode suivante :

Un gramme de l'échantillon à analyser est séché à 100° jusqu'à poids constant; on a ainsi l'humidité. La substance sèche est ensuite transvasée dans un bécher bien sec de 200 centimètres cubes et lavée avec de l'éther jusqu'à complète élimination de la matière grasse. Les liquides éthérés, après filtration, sont évaporés dans un vase taré, et la matière grasse est pesée; le *résidu*, après extraction par l'éther, est dissous dans de l'acide chlorhydrique dilué et chaud; la solution chaude ainsi obtenue est filtrée sur le filtre qui a servi à filtrer l'éther, et ce filtre est ensuite lavé à l'eau chaude; le résidu insoluble provenant de ce dernier traitement est traité par de l'acide nitrique. La solution est filtrée sur le même filtre que précédemment qu'on calcine ensuite; on obtient ainsi la silice mélangée d'un peu de carbone, qui résiste énergiquement au grillage; on fond avec un peu de peroxyde de sodium, et la silice est séparée avec la méthode habituelle. Le filtrat nitrique est évaporé avec de l'acide sulfurique et ajouté au filtrat chlorhydrique; celui-ci est précipité par de l'acide sulfhydrique, et le précipité obtenu après séparation du liquide est mis à digérer avec de l'acide chlorhydrique chaud à 50 °/₀ pour séparer le cuivre et le plomb. L'insoluble, constitué par du sulfure de cuivre, est dissous dans de l'acide nitrique, et le cuivre est titré au moyen du

(1) J.-E. Clennell, *Annales de chimie analytique*, 15 décembre 1917, p. 248.

cyanure de potassium. La liqueur contenant le plomb, neutralisée par l'ammoniaque, acidifiée à l'aide de l'acide acétique, est précipitée avec un chromate alcalin; le filtrat dans lequel a eu lieu la précipitation par l'acide sulfhydrique est oxydé et traité par un excès de soude caustique; le précipité formé est dissous et reprécipité par l'ammoniaque. Le nouveau précipité est constitué par de l'oxyde de fer, et, après filtration, la liqueur contient le magnésium.

Le filtrat alcalin contient l'aluminium et le zinc; on le précipite par le sulfure de sodium et le sulfure de zinc obtenu est dosé avec l'iode N/10 et l'hyposulfite de soude. L'aluminium peut être grossièrement déterminé en acidifiant ce dernier filtrat et en chassant l'acide sulfhydrique par une ébullition prolongée, amenant le volume du liquide à 500 centimètres cubes, et prenant 100 centimètres cubes de cette solution qu'on titre avec la soude normale, en employant d'abord comme indicateur le méthylorange et ensuite la phénolphtaléine. La différence entre les deux indicateurs représente l'aluminium. La solution alcaline pour ce dosage est titrée comparativement avec de l'aluminium pur.

Moyen de distinguer l'aluminium pur de ses alliages. — Nicolardot a indiqué le procédé suivant pour distinguer rapidement l'aluminium pur de ses alliages :

On nettoie le métal avec un abrasif, puis on badigeonne aussitôt la surface mise à nu avec une solution contenant 1 gramme de chlorure ou de cyanure mercurique par litre d'eau. Sur le métal *pur*, on constate une poussée rapide de petits filaments blancs d'alumine, tandis qu'un alliage contenant par exemple 3 $^0/_0$ seulement de cuivre demeure absolument inaltéré.

IV. — Influence des traitements sur les propriétés de l'aluminium au point de vue de ses emplois.

Altérabilité. — La question de l'altération lente ou spontanée de l'aluminium a fait l'objet de nombreuses études et notamment de la part de Moissan, Ditte, H. Le Chatelier, Ducru, Heyn et Bauer.

Ditte admet que, si l'aluminium paraît inaltérable à l'air, il doit cette propriété à la facilité qu'il a de s'oxyder superficiellement en se recouvrant d'une couche mince et imperméable d'alumine. Au contact de l'eau, il ne subit pas d'altération sensible tant que cette couche subsiste. « Mais toutes les fois, dit-il, que l'aluminium se trouvera *à la fois* en contact avec l'atmosphère, l'eau salée, l'eau de mer ou l'eau saumâtre, le métal attaqué se recouvrira d'une couche plus ou moins compacte d'alumine, mélangée d'autres sels solubles ou non. Si l'aluminium, une fois retiré du liquide, n'est pas entièrement débarrassé de cet enduit, s'il n'a pas subi des lavages convenables le dépouillant de toute trace de matière alcaline, son altération continuera à se faire. Partout où la surface extérieure du métal aura laissé pénétrer une trace de sel marin, l'attaque continuera lentement, se faisant d'autant mieux que la matière oxydée sera plus hygrométrique et rendra plus facile la réalisation des réactions chimiques possibles. »

Toutefois, il paraît démontré (H. Le Chatelier, Ducru, Heyn et Bauer) que les altérations des objets en aluminium ne consistent pas seulement en une oxydation ou une attaque chimique ou électrolytique du métal, mais surtout en une désagrégation mécanique amenant la séparation des fibres qui conservent individuellement l'éclat métallique; cette dernière constatation est importante. Les accidents de ce genre ne se manifestent guère que sur les échantillons ayant été fortement écrouis; ils sont comparables à ceux depuis longtemps constatés sur le laiton trop fortement écroui.

Influence de l'écrouissage : corrosion et désagrégation de l'aluminium. — L'influence de l'écrouissage a été étudiée sur des ustensiles de campement militaire, sur des tôles et des disques servant à la confection d'objets courants en aluminium. Les tôles présentent de grandes différences comme résistance chimique; ces différences ne tiennent pas à un écart essentiel de composition chimique, mais au degré de l'écrouissage. Les efflorescences et corrosions constatées sont, les unes réparties irrégulièrement, les autres disposées suivant une direction déterminée, rectiligne sur le fond (*fig.* 17) ou infléchies en courbes sur les parois des récipients

(*fig.* 18). Cela démontre clairement que ces défauts tiennent au sens du laminage de la tôle primitive.

Heyn et Bauer, pour se rendre compte exactement de l'influence simultanée des traitements mécaniques et des actions extérieures (air atmosphérique, eau, etc.), se sont servis de plaques d'aluminium. Pour mesurer l'influence des *agents atmosphériques*, les plaques étaient placées sur le toit d'un bâtiment et protégées de la pluie et de la neige par une cloche en verre. Après plus de 200 jours d'exposition, elles ne présentèrent aucun changement d'aspect.

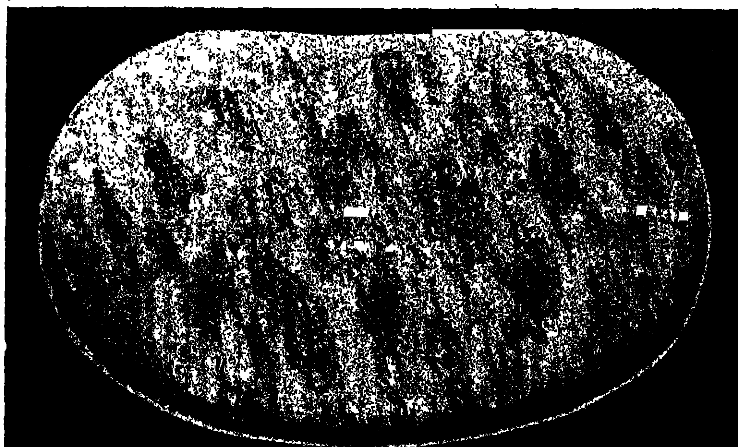


FIG. 17. — Corrosions disposées rectilignement sur le fond d'un récipient en aluminium.

L'influence de l'*eau* fut étudiée en plongeant les plaques, les unes dans de l'eau distillée, les autres dans l'eau des conduites; cette dernière renfermait par litre 12 milligrammes de silice, 96 de chaux, 12 de magnésie, 71 d'acide carbonique, 34 d'acide sulfurique et 26 de chlore. Au bout de 207 jours, le dépôt blanchâtre formé sur l'aluminium fut enlevé avec une brosse dure et le reste dissous avec de l'acide sulfurique étendu par l'eau distillée et avec de l'acide nitrique pour l'eau des conduites; dans les deux cas, les acides étaient additionnés de bichromate de potasse. Ces mélanges, qui n'attaquent pas sensiblement l'aluminium, donnent les résultats suivants :

L'aluminium est attaqué uniformément par l'eau distillée, les tôles dures étant les moins atteintes ; le dépôt produit est de l'alumine hydratée à peu près pure. Il est fortement attaqué par l'eau des conduites. L'attaque, assez locale, dépend essentiellement du traitement préalable de l'aluminium : elle est *maximum avec les tôles dures ou écrouies* (*fig.* 21, A), minimum avec les tôles douces ou recuites (*fig.* 21, B).

L'action alternée de l'air et de l'eau des conduites (cas de la pratique courante) produit une attaque locale et moins forte qu'avec l'eau seule.

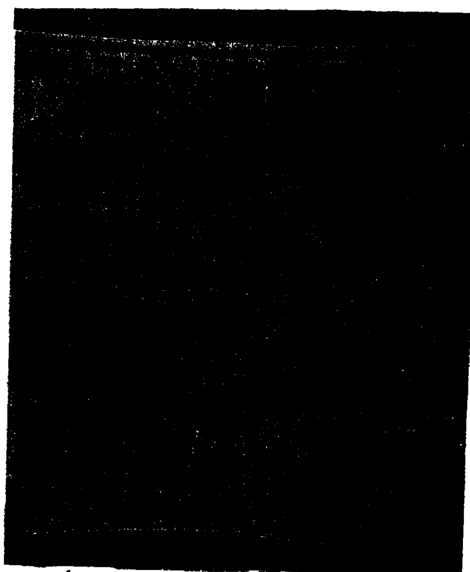


FIG. 18. — Corrosions disposées en courbes sur les parois latérales d'un récipient en aluminium.

On a constaté aussi que l'attaque augmente avec la *température* de l'eau et la présence de l'*acide carbonique*, qui exerce une action dissolvante : l'attaque est uniforme et d'autant plus forte que la tôle a subi plus fortement l'écrouissage. Les *solutions salines* (sulfate de calcium, mélange de sulfate de calcium, de carbonate de calcium, de chlorure de calcium et de silice) agissent d'autant plus fortement qu'elles sont plus concentrées.

Il y a donc deux sortes d'attaques : l'une régulière et se manifestant sur toute la surface du métal avec formation d'alumine hydratée ; l'autre se manifestant par des corrosions locales, boursouflures et exfoliations causant une détérioration profonde du métal. Il se produit l'une ou l'autre suivant :

1° L'*état moléculaire de l'aluminium* : les corrosions sont dues à l'écrouissage et ne se manifestent pas après recuit ;

CORROSION DE L'ALUMINIUM

(ATTAQUES AU CHLORURE DE SODIUM PAR VOIE ÉLECTROLYTIQUE)



FIG. 19. — Aluminium altérable, spontanément désagrégé.
(Gross. : 200 diam.)

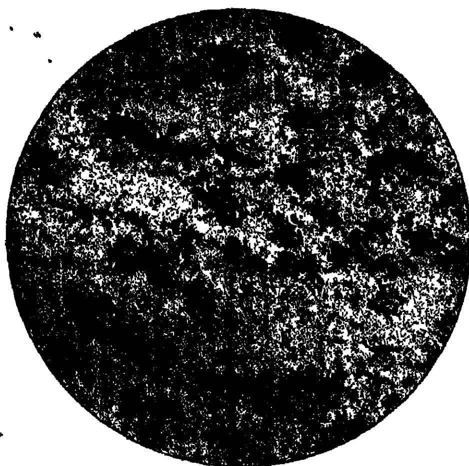


FIG. 20. — Aluminium sain, non altéré.
(Gross. : 200 diam.)



2° La *nature de l'eau où de la solution saline* (eau des conduites, sels de chaux) ; en fait, les efflorescences constatées contiennent toujours un peu de chaux et des traces de silice. Le contact des eaux calcaires naturelles favoriserait donc la désagrégation de l'aluminium écroui.

L'intervention des réactions chimiques, sans être tout à fait nulle, n'est en général qu'un excitant dont le principal rôle est de faciliter une transformation du métal écroui. On pourrait donc utilement recuire les ustensiles (à 450° par exemple, ou tout au moins les écrouir le moins possible pour réduire ces inconvénients au minimum.

La *composition chimique* de l'aluminium ne semble pas avoir une influence bien sensible comparativement à celle produite par l'écrouissage.

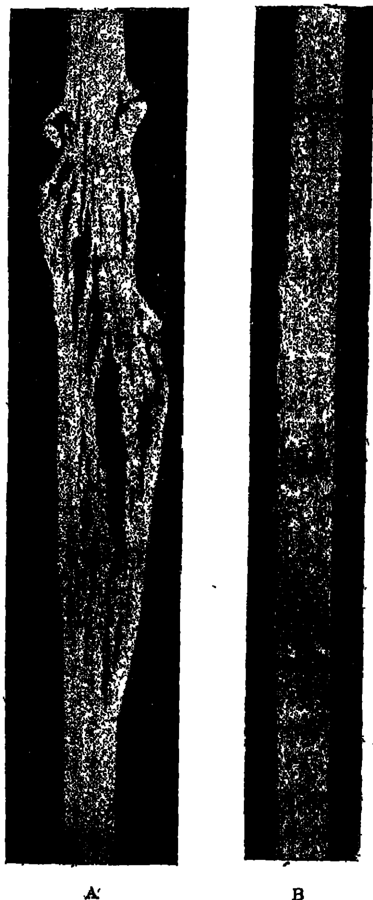


Fig. 21. — Altérabilité de l'aluminium.

A, aluminium *écroui* : altération maximum. — B, aluminium *recuit* : altération minimum.

Les *variations de température*, comme celles qui résultent de l'usage d'objets allant sur le feu ou recevant des liquides chauds, combinées aux effets mécaniques et chimiques, peuvent expliquer le mécanisme de la désagrégation *spontanée* de certains échantillons d'aluminium : par ces diverses actions réunies, les joints des cellules s'ouvrent et isolent des grains métalliques ; au bout d'un certain temps, le métal, primitivement compact, se transforme ainsi en une masse pulvérulente.

Il est assez facile de caractériser à ce point de vue un aluminium

altérable et un aluminium *sain*. La figure 19 montre, d'après H. Le Chatelier, au grossissement de 200 diamètres, une coupe d'un fond de gamelle spontanément désagrégé après un temps de service très court. On l'a soumise pendant quelques minutes à l'action d'un courant de 10 milliampères par centimètre carré dans une solution de chlorure de sodium; l'échantillon étudié servait d'anode. On voit un réseau cellulaire très net et, en outre, des trous noirs polygonaux résultant de l'arrachement de quelques cellules. Le métal n'a pas été dissous par le réactif, mais des fragments métalliques ont été enlevés; ils nagent en effet dans le liquide sous forme de paillettes brillantes. La figure 20 montre, au même grossissement, un échantillon d'aluminium non altéré, soumis à la même attaque électrolytique. On constate la présence de taches noires irrégulières correspondant aux points où le métal a été chimiquement dissous, mais on n'observe nulle part d'arrachement de parcelles métalliques; on ne voit pas non plus de réseau à aspect cristallin.

Ces constatations expliquent la cause et le mécanisme de la désagrégation de certains échantillons d'aluminium dans lesquels on voit surtout l'effet d'une action mécanique première.

Inflammabilité des poussières d'aluminium. — On sait que les poussières peuvent, dans certaines circonstances, provoquer des incendies et même des explosions subites. En ce qui concerne l'aluminium, ces dernières se produisent sous des influences diverses.

Dans la fabrication de la poudre d'aluminium (v. p. 102), on les attribue généralement à la chaleur dégagée par le frottement des balais lors de leur traitement final. On a en outre observé que la poudre pure n'explose pas par l'action des étincelles électriques; mais, si elle se trouve mêlée à un gaz inflammable, la conflagration se produit. On est ainsi arrivé à cette déduction que le danger d'explosion de la poussière d'aluminium était augmenté par la présence, au sein de celle-ci, du carbure de ce métal (v. p. 254) qui, en présence de l'humidité, donne naissance à du méthane.

Pour supprimer ces accidents, il convient donc d'utiliser de l'aluminium aussi pur que possible et, en outre, de ne manipuler en grand la poudre d'aluminium que dans des pièces de construction appropriée ou même en plein air.

Fusion de l'aluminium. — L'aluminium peut être fondu dans des creusets ordinaires en plombagine sur un feu de coke; mais pour de grandes quantités, on emploie généralement un four à réverbère chauffé à la houille. Afin d'éviter la combustion, le métal ne doit pas être porté au delà de 725°, car à cette température l'aluminium s'oxyde facilement au contact de l'air. L'alumine qui en résulte a pour résultat de former autour de l'aluminium fondu une sorte de protecteur.

On se rend bien compte de ce fait en chauffant un fil d'aluminium dans la flamme d'un bec de gaz : la surface du fil se transforme en alumine, laquelle forme une poche cylindrique continue dans laquelle l'aluminium fondu se trouve séparé de l'oxygène de l'air et la combustion du fil ne se produit pas (Matignon). La résistance de cette enveloppe est suffisante pour supporter le métal fondu, qui ne coule pas si le diamètre du fil n'est pas trop grand. En apparence, l'aluminium semble ainsi avoir un retard à la fusion qui n'est dû, en réalité, qu'à la présence de l'alumine superficielle.

L'aluminium peut être coulé dans des moules en sable, ou en coquille. Ce dernier procédé est généralement employé pour les petits moulages unis lorsqu'on veut obtenir un travail très soigné. Les moulages obtenus à l'aide de moules en acier poli présentent une surface parfaitement lisse.

Les moules en sable conduisent lentement la chaleur et les lingots obtenus sont plus ou moins cristallins. Il y a intérêt à enlever rapidement la chaleur au métal en fusion pour le rendre plus homogène. Les moules au carborundum remplissent ce but; ils sont constitués par un mélange de ce corps finement pulvérulent ($4^{kg},5$), une faible quantité de sucre ($0^{kg},35$) et d'argile ($0^{kg},28$) ; on en forme une masse plastique à laquelle on donne la forme des moules et qu'on cuit ensuite.

L'aluminium destiné à être laminé est moulé en grands saumons ou lingots, qui sont ensuite laminés à chaud.

Pratiquement, pour la bonne conduite de la fusion, on jette d'abord quelques morceaux d'aluminium dans le creuset ; aussitôt qu'ils commencent à fondre, on en ajoute d'autres jusqu'à ce que le creuset contienne la quantité dont on a besoin. On brasse avec l'écumoire et, dès que le métal fondu est assez chaud pour ne plus

adhérer au fer, on retire le creuset du feu, on brasse à nouveau, on écume et on coule.

Les outils avec lesquels on brasse l'aluminium ne doivent jamais atteindre la chaleur du rouge : à cette température, en effet, il y aurait incorporation de fer dans l'aluminium. Si, au cours de l'opération, un ringard venait à être porté au rouge, il faudrait le laisser refroidir et se servir d'un ringard plus froid.

M. Billon-Daguerre utilise la *fusion dans le vide* pour supprimer les gaz occlus dans l'aluminium, lorsque celui-ci est destiné à être employé pur, dans la fabrication des cathodes de tubes à vide (lampes à vapeurs métalliques), par exemple. On se sert, pour cette fusion, d'un tube de quartz ayant la forme représentée par la figure 22. On y introduit de la grenaille d'aluminium A ; on fait le



Fig. 22. — Tube de quartz pour la fusion et la purification de l'aluminium dans le vide.

vide pendant qu'on chauffe à la fusion; on scelle ensuite en B et on laisse refroidir en tenant le tube verticalement. On brise celui-ci en *xy*, ce qui permet de recueillir en *a* un culot qu'il suffit de scier, couper et polir pour le rendre utilisable immédiatement. L'aluminium ainsi obtenu perd toute sa porosité ; la présence de gaz occlus, qui nuisent à son emploi comme cathode, est ainsi évitée.

Entretien de l'aluminium. — *Nettoyage.* — Il s'effectue aisément en lavant l'intérieur des objets à l'eau chaude et au savon. Pour l'extérieur, on se sert d'une poudre à polir. Les ustensiles ayant été en plein feu peuvent être nettoyés à la brique pilée finement. Il faut avoir soin de ne pas employer de carbonates de soude ou de potasse qui rongent le métal.

On emploie aussi le mélange suivant :

Oléine commerciale.......	10 parties
Carbonate d'ammoniaque................	1 —
Chaux de Vienne..................	1 —

de même que celui-ci :

Tripoli	60 parties
Terre à foulon	10 —
Acide stéarique	10 —

Ces pâtes peuvent être préparées d'avance; le mélange doit être très homogène.

Polissage. — Il s'effectue à l'aide d'une poudre ou d'une pâte abrasive très fine (sanguine) en utilisant une peau de mouton garnie de sa laine ou d'une peau de chamois. On peut encore, pour obtenir un blanc éclatant, imbiber le produit polissant d'une émulsion préparée en agitant fortement parties égales de rhum et d'huile d'olive.

Le polissage proprement dit se fait à l'aide de sanguine et d'un brunissoir ; comme lubrifiant on emploie, soit le pétrole, soit une mixture composée de deux cuillérées à bouche de borax dissous dans un litre d'eau chaude à laquelle on ajoute quelques goutes d'ammoniaque.

Matage. — Le matage des objets en aluminium s'effectue à l'aide d'une solution chaude à 10 % de bicarbonate de soude saturée de sel marin. Les pièces sont trempées dans cette solution pendant quinze à vingt secondes, retirées et brossées, puis trempées à nouveau pendant un instant pour être ensuite soigneusement rincées à l'eau courante et enfin séchées dans la sciure de bois. La couleur obtenue par ce traitement est celle de l'argent mat ; elle est due à une très légère attaque du métal en même temps qu'à un très minime dépolissage de sa surface.

Enduits protecteurs. — On ne peut songer à eux pour les ustensiles en service, mais, pour la conservation des objets en aluminium, on peut utiliser avec profit la vaseline. De nombreux essais ont démontré que l'attaque desdits objets par l'eau ordinaire était à peu près nulle tant au point de vue de la corrosion que de l'attaque générale.

Neuhardt a en outre indiqué le mode de préparation d'un *vernis* qui protège efficacement l'aluminium. On opère comme suit :

On fait dissoudre, de préférence dans un vase émaillé, 100 parties en poids de gomme laque dans 300 parties d'ammoniaque. On chauffe au bain-marie pendant une heure environ et on laisse refroidir, après quoi le vernis est prêt à être employé. L'aluminium que l'on veut recouvrir de ce vernis est soigneusement décapé par de la potasse faible; on le laisse sécher dans un endroit chaud après l'avoir lavé à l'eau tiède et, après avoir enduit sa surface avec le vernis, on le chauffe un quart d'heure à 250° environ dans un four. Ce vernis protecteur, qui est incolore, permet ensuite de peindre ou de recouvrir la surface des objets d'un produit quelconque sans aucune crainte d'effritement.

Écriture sur aluminium. — Pour écrire sur des feuilles ou plaques d'aluminium (étiquettes de jardin notamment), il faut utiliser, non de l'encre ordinaire, mais de l'encre d'imprimerie; on la dilue dans de la benzine ou de l'alcool afin de rendre l'écriture indélébile et, après avoir écrit, on chauffe le métal au rouge sombre et on le laisse ensuite refroidir. Ce procédé convient très bien à toutes les inscriptions devant rester en pleine air ou être exposées à l'action des intempéries.

CHAPITRE III

APPLICATIONS INDUSTRIELLES DE L'ALUMINIUM

I. — Applications métallurgiques.

Affinage des fontes et des aciers. — L'aluminium possédant d'énergiques propriétés réductrices peut servir utilement à l'affinage des fontes et des aciers. Ajouté en faible proportion à l'acier ou au bronze, au moment de la coulée il se comporte comme un agent dont l'effet est comparable à celui du silicium ; il réduit les oxydes existant dans le métal, rend celui-ci plus ductile et évite la formation des soufflures.

Introduit dans la fonte liquide, il déplace son carbone sous forme de graphite et lui donne un grain serré et plus homogène. C'est ainsi qu'une fonte ayant la composition suivante :

Carbone total	3,67 %
Carbone graphitique	0,40
Silicium	0,48
Manganèse	0,11

donne, après addition d'aluminium, les résultats ci-après :

Pour	1 %	d'aluminium..	3,48 %	de carbone	graphitique.
—	4	— ..	2,05	—	—
—	12	— ..	0,16	—	—

Ces chiffres semblent montrer que le pourcentage de graphite dépend de la teneur en aluminium et que, pour 1 % de ce corps, presque tout le carbone est à l'état de graphite.

La chaleur dégagée par l'oxydation de l'aluminium au contact des oxydes contenus dans les fontes et aciers est suffisante pour porter la masse métallique à 1.400° environ. Cette chaleur d'oxydation est contenue tout entière dans le bain, ce qui provoque une émulsion rapide de toute la masse. L'alumine, insoluble dans le bain, passe dans les scories et surnage.

C'est généralement sous forme d'aluminium pur, plus qu'à l'état d'alliage ferreux, qu'on utilise ce métal en sidérurgie. On jette un petit fragment d'aluminium au fond de la poche et on coule quelques gouttes de fonte qui l'emprisonnent et lui fournissent la chaleur nécessaire lui permettant d'entrer en fusion. Dès que la fonte est versée dans la poche, on remarque un bouillonnement intense accompagné d'un grand développement de chaleur, et la fonte prend un aspect presque transparent. On évite la réoxydation en recouvrant la fonte de sable ou de charbon. Pour que la réaction se produise dans de bonnes conditions, la fonte doit être à une température suffisante; sans cette précaution, elle serait à peu près nulle.

Pour les pièces massives, il faut avoir soin d'attendre que la réaction soit terminée pour ne pas s'exposer à avoir des dépôts d'alumine à la partie supérieure des pièces coulées. Pour les pièces minces, il faut couler rapidement afin d'éviter les refus dans les parties délicates et celles éloignées de la coulée.

Pour les aciers, la proportion d'aluminium à ajouter varie suivant leur qualité et leur emploi. Pour ceux à 0,5 °/₀ de carbone, on ajoute de 160 à 320 grammes d'aluminium par tonne; pour ceux à plus de 0,5 °/₀, on n'ajoute que 150 à 200 grammes de métal.

Nous avons dit que la présence de l'aluminium en petite quantité supprime les *soufflures*. Ces dernières sont dues au dégagement partiel, au moment où le métal se refroidit, des gaz absorbés pendant la fusion; or l'aluminium possède la propriété de réagir chimiquement ou de se combiner avec la plupart de ces gaz.

Les fonderies de fer et d'acier qui emploient dans ce but l'aluminium sous forme de *ferro-aluminium* utilisent celui à 90 °/₀ de fer et 10 °/₀ d'aluminium Cet alliage, très cassant, peut être ainsi utilisé facilement avec la quantité nécessaire, au moment même de la coulée. Plusieurs métallurgistes emploient l'*aluminium granulé*, la

grosseur des grains pouvant varier entre celle d'un grain de riz et celle du sable.

Les producteurs d'aluminium livrent aussi de petits blocs d'aluminium ayant des poids fixes, ce qui évite aux industriels d'avoir à peser le métal au moment de son emploi ; cela permet d'ajouter telle quantité déterminée d'aluminium à la fonte ou à l'acier avec le minimum de pertes et de difficultés.

On emploie annuellement environ 2.000 tonnes d'aluminium, dans le monde, comme réducteur, dans la fabrication des fontes et des aciers.

La *thermite* (v. p. 83) sert au même usage.

Ferro-aluminium et aciers à l'aluminium. — Les premiers alliages industriels de fer et d'aluminium sont dus aux frères Cowles qui les obtinrent par réduction électrothermique de l'alumine par le carbone en présence du fer.

On chargeait le fer avec une certaine quantité de fer, puis on abaissait l'anode et on faisait passer le courant. La fusion du métal se produisait rapidement ; on introduisait alors alternativement de petites charges de fer et d'alumine jusqu'à ce que le creuset fût rempli. On obtenait ainsi des ferro-aluminiums de composition variable.



FIG. 23. — Ferro-aluminium montrant la présence du constituant $FeAl^3$. — Gross. : 50 diam. Polissage en bas-relief (d'après L. Guillet).

Actuellement, les alliages de fer et d'aluminium sont peu employés : on leur préfère généralement l'aluminium. Ils se préparent au four électrique, soit par la réduction de l'alumine en présence de fer, soit par addition d'aluminium dans un bain de fer fondu. Dans ce dernier cas, on obtient facilement des alliages renfermant 10 % d'aluminium ;

c'est du reste cet alliage qui est le plus employé bien qu'on en prépare aussi à 20 °/₀ d'aluminium. On connaît les combinaisons définies Fe^3Al^2, $FeAl^2$, $FeAl^3$ (*fig.* 23 et 24) et Fe^2Al^3.

Dès que la proportion d'aluminium atteint 6 °/₀ environ, l'alliage devient fragile ; à 7 °/₀, sa structure est cristalline. Jusqu'à 20 °/₀ d'aluminium, les alliages sont magnétiques, mais non au-dessus de ce pourcentage. C'est pourquoi on fabrique, depuis quelques années, des aciers renfermant des quantités assez importantes d'aluminium et qui trouvent des débouchés dans les constructions électriques (tôles de dynamos) en raison de leur faible hystérésis magnétique.



Fig. 24. — Constituant $FeAl^3$. Même échantillon que celui de la figure 23, mais grossi à 100 diamètres.

L'aluminium semble avoir peu d'influence sur les propriétés mécaniques des aciers tant que son pourcentage ne dépasse pas 3 °/₀. A 3 °/₀ d'aluminium, il y a une diminution sensible dans les allongements et la striction. A 5 °/₀, on note une légère augmentation dans la charge de rupture. A 7 °/₀, les aciers sont fragiles. L'acier à 15 °/₀ d'aluminium, qui présente une microstructure spéciale, possède une charge de rupture élevée.

D'après L. Guillet, dans les aciers à l'aluminium ce métal entre en solution dans le fer et cette solution empêche la perlite de se développer, la forçant à prendre une forme granulaire. Pour des teneurs très faibles d'aluminium (*fig.* 25), on a de la perlite et de la ferrite ; quand la teneur en aluminium est assez élevée, la perlite devient plus compacte, puis ne peut plus se former du tout et on a alors de la cémentite. Il ne se produit pas de graphite, comme on pourrait le croire d'après la constatation faite que l'aluminium précipite le carbone dans les fontes sous cette forme, comme nous l'avons vu plus haut (p. 73).

Aluminothermie. — La quantité de chaleur dégagée par l'aluminium brûlant à l'état de métal en présence d'un oxyde étant considérable, on conçoit qu'il puisse être utilisé pratiquement pour la réduction d'un grand nombre d'oxydes réfractaires. C'est ce qui a bien lieu en effet et on a donné le nom d'*aluminothermie* aux opérations qui ont précisément pour but d'utiliser la température élevée produite par la combustion de l'aluminium en présence de l'oxygène. Ces opérations concernent notamment la préparation, au laboratoire ou dans l'industrie, des *métaux réfractaires* (chrome, manganèse, vanadium), des ferro-alliages, des alliages d'aluminium, la soudure des rails, des tubes et profilés. Elles prennent une importance pratique chaque jour plus considérable.

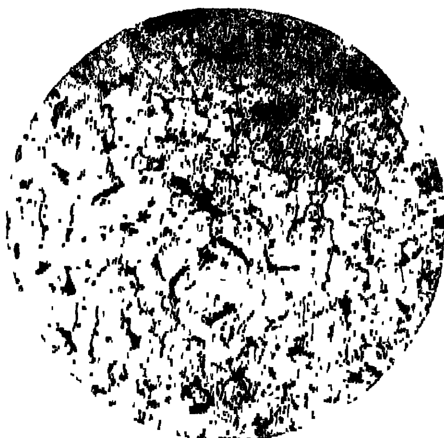


Fig. 25. — Acier à l'aluminium à 0,085 % de carbone et 0,5 % d'aluminium : perlite et ferrite. — Attaque à l'acide picrique. (Gross.: 200 diam.)

Plusieurs opérations sont néanmoins nécessaires pour la production des métaux ou des alliages par ce procédé. Ce sont : la *préparation du mélange* d'aluminium avec le ou les oxydes à réduire ou à allier avec l'aluminium; la préparation de la *poudre d'allumage* destinée à amorcer la réaction; la préparation du *creuset* ou four de réaction; l'opération proprement dite.

Dans la préparation du mélange, il faut employer des matières parfaitement desséchées et éviter la présence de corps volatils ou décomposables à la température élevée de la réaction. L'aluminium doit être aussi pur que possible; on l'emploie à l'état de poudre, de grains ou de copeaux.

La poudre d'allumage est généralement composée d'un mélange de bioxyde de baryum et d'aluminium en poudre dans lequel on fixe un ruban de magnésium destiné à enflammer le tout.

Le creuset peut être en terre ou en plombagine; on le gar intérieurement de magnésie pour éviter l'action des matières- fusion sur le carbone et le silicium renfermés dans ce creuset. magnésie doit être fortement calcinée avant son application, partie à basse température, en partie à haute température, a d'éviter des retraits et des fendillements au séchage.

L'opération est très simple et rapide. Le creuset étant bi séché, on y place une petite quantité du mélange préparé préal blement, puis on verse au centre de la surface supérieure quelq grammes de la poudre d'allumage et on enflamme cette derniè Il se produit une légère explosion; le mélange d'aluminium et bioxyde de baryum entre en réaction et communique le feu à tou la masse qui entre rapidement en fusion. Dès que le bain appar nettement liquide, on ajoute le mélange d'aluminium et de ou d oxydes à réduire, jusqu'à ce qu'on ait dépensé toute la matic préparée. On laisse ensuite refroidir et, au bout de quelque tem on brise le creuset. Si l'opération a été bien conduite, on trou une matière qui se sépare aisément en deux parties : un cul constitué par le métal ou l'alliage formé aux dépens de l'oxyde, à partie supérieure, de l'alumine dure genre de corindon arti ciel auquel on a donné le nom de « corubis ».

Préparation des métaux et alliages. — Dans le cas du chrome, réaction est la suivante :



$$Cr^2O^3 + 2Al = Al^2O^3 + 2Cr.$$

La température produite varie entre 2.500° et 3.000°. Le mét obtenu est très pur, le procédé très rapide ; mais, malgré l nombreux perfectionnements dont il a été l'objet, il est tou jours assez coûteux. Cependant, il a été appliqué industriell ment à la préparation de plusieurs alliages importants tels que ferro-chome, le ferro-titane, le ferro-molybdène, le ferro-tung stène, le ferro-vanadium. On l'a combiné aussi avec l'empl du four électrique, notamment pour la préparation de certair métaux très réfractaires, tels que le vanadium, le tungstène et l molybdène.

L'appareil le plus généralement employé pour l'application d

la méthode aluminothermique est celui représenté par la figure 26 qui permet d'obtenir des alliages très purs. Il se compose essentiellement d'un grand creuset *a*, en terre réfractaire ou en plombagine, garni intérieurement d'une brasque en magnésie ; l'épaisseur de cette dernière va en augmentant des bords au fond du creuset et celui-ci est disposé sur une couche de charbon contenue dans une enveloppe en briques réfractaires. Pour combler l'espace, on ajoute de petits morceaux de coke qui forment une sorte d'enveloppe isolant le creuset de l'extérieur et le protégeant ainsi contre les courants d'air possibles qui pourraient le briser.

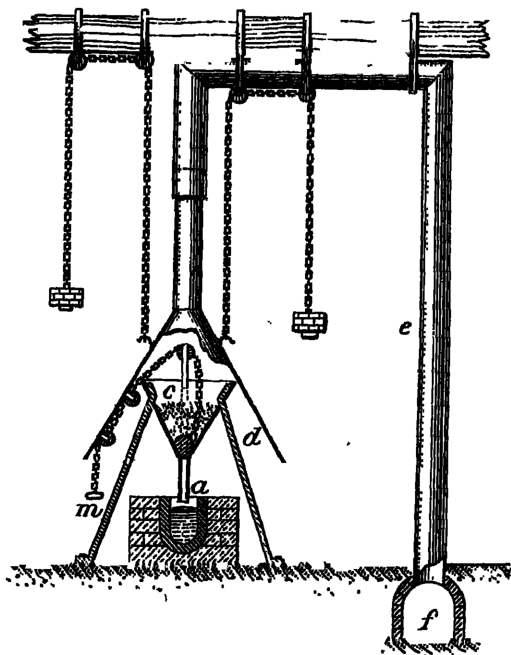
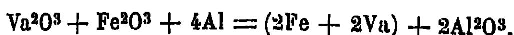


FIG. 26. — Four pour la production industrielle des réactions aluminothermiques.

Au-dessus du creuset est une trémie ou entonnoir de chargement *c* destiné à introduire dans le creuset le mélange à réduire ; une chaîne *m* permet cette manipulation. L'évacuation des fumées dégagées au cours de l'opération est assurée à l'aide d'un capuchon *d* aboutissant à une conduite *e* engagée dans une souche de cheminée *f*.

L'opération est généralement discontinue vu la difficulté d'obtenir des coulées régulières par la base du creuset ; mais une fois la réaction terminée (quelques minutes), il est facile de vider le creuset par bascule en retirant, d'une part l'alliage fabriqué et, d'autre part, le laitier.

Dans le cas du *ferro-vanadium*, la réaction est la suivante :



$$Va^2O^3 + Fe^2O^3 + 4Al = (2Fe + 2Va) + 2Al^2O^3.$$

Le produit obtenu est d'une grande pureté, présente un aspect très homogène, un éclat nettement métallique et il peut être utilisé directement en métallurgie.

Comme autres exemples d'applications de l'aluminothermie à la préparation des métaux et ferro-alliages, nous citerons celle concernant le *manganèse*. On obtient ainsi un métal ne contenant aucune trace de carbone et pouvant être préparé par centaines de kilogrammes à l'heure dans des creusets de dimensions relativement restreintes. L'opération peut être rendue continue en disposant dans le creuset deux trous de coulée, l'un pour le métal et l'autre pour la scorie. Une fois la masse convenablement fondue, il suffit, pour obtenir la quantité de métal nécessaire, d'introduire dans le creuset, continuellement et en proportion déterminée, le mélange d'oxyde de manganèse et d'aluminium. Les usines d'Essen, en Allemagne, et de Saint-Michel-de-Maurienne, en France, préparent le manganèse de cette façon.

On peut obtenir du manganèse très pur (à 98,8 $^0/_0$ Mn) en mélangeant l'oxyde salin, Mn^3O^4, à de la poudre d'aluminium dans les proportions suivantes, en poids :

Mn^3O^4....................................	750 parties
Al....................................	200 —

Le métal ainsi obtenu ne renferme que des traces de silicium et 1 $^0/_0$ environ de fer et d'aluminium. Il est brillant, dur et presque inaltérable à l'air; cette dernière propriété constitue une des principales qualités du manganèse aluminothermique.

Le *chrome* se prépare d'une façon analogue. Les creusets sont à parois très épaisses, de manière à pouvoir résister à la pression et à la chaleur produites au cours de l'opération. Les principales impuretés du métal obtenu sont, comme précédemment, le silicium, le fer et l'aluminium ; elles proviennent en majeure partie des matières premières qu'il est difficile d'éliminer complètement du mélange initial à cause des frais que cette préparation entraînerait.

On peut arriver cependant à préparer du chrome très pur en partant, non pas du sesquioxyde Cr^2O^3, mais d'un mélange composé de ce dernier corps et d'une certaine proportion d'anhydride CrO^3. On effectue le mélange dans la proportion suivante :

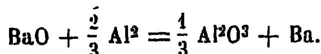
Cr^2O^3	600 parties
CrO^3	60 —
Al	210 —

La réduction s'effectue très rapidement et sans projections.

Pour le *tungstène*, on part de l'acide tungstique, TuO^3. Dans un creuset surmonté d'une hotte aboutissant à une cheminée comme celui dont il a été précédemment question, on place le mélange dessus et on l'enflamme à l'aide d'un cordon Bikeford mis au contact de la cartouche de bioxyde de baryum. On obtient un métal très pur si l'on a pris soin de mettre l'acide tungstique en léger excès; on évite ainsi la formation de l'alliage $TuAl^4$, lequel se dissoudrait dans le métal et nuirait à ses applications métallurgiques.

Pour le *molybdène*, on utilise le molybdate de calcium. On obtient un métal très pur, mais son prix de revient, comme du reste celui du tungstène obtenu de la même façon, est assez élevé. Les méthodes électrothermiques sont, à ce titre, préférables et suffisantes pour l'obtention de ces métaux destinés aux opérations sidérurgiques.

M. Guntz a utilisé aussi l'aluminothermie pour la préparation du baryum métallique. Elle s'effectue d'après l'équation :



$$BaO + \frac{2}{3} Al^2 = \frac{1}{3} Al^2O^3 + Ba.$$

La réaction est encore facilitée par la volatilité du baryum qu'on recueille par condensation.

Les *ferro-chromes* se préparent à l'aide d'un mélange composé de sesquioxyde de chrome, de sesquioxyde de fer et d'aluminium. La réaction est plus ou moins violente et l'alliage plus ou moins riche suivant les proportions choisies. Mais, pour éviter les frais causés par l'emploi de l'aluminium en poudre, on choisit de l'aluminium en lingots et on associe les deux méthodes aluminothermique et électrothermique.

Dans ce but, on peut utiliser un four à électrode garni intérieurement de briques de magnésie. L'aluminium est d'abord introduit dans le four et, lorsqu'il est entièrement fondu, on ajoute progressivement la charge de minerai (chromite, Cr^2O^3, FeO), celui-ci étant grossièrement concassé. L'oxyde de fer est alors réduit et le fer se dissout dans l'aluminium ; puis c'est le tour de l'oxyde de chrome qui s'allie au fer pour donner du ferro-chrome. Avec une dépense relativement faible, on peut facilement préparer ainsi 300 kilogrammes de ferro-chrome à 75 $^0/_0$ en une demi-heure. La réduction de 100 kilogrammes de chromite à 65 $^0/_0$ d'oxyde de chrome donne environ 56 kilogrammes de ferro-chrome à 70 $^0/_0$ et exige pour cela 32 kilogrammes d'aluminium.

Le *ferro-tungstène* s'obtient en réduisant simultanément l'oxyde de fer et l'oxyde de tungstène. Les alliages obtenus sont d'une extrême pureté et magnétiques. On les emploie avec succès dans la fabrication des aciers à coupe rapide.

Le *ferro-vanadium* s'obtient d'une façon analogue, comme nous l'avons vu plus haut ; il se différencie de l'alliage obtenu par les procédés électrothermiques par ses reflets et son éclat légèrement jaunâtre.

On a du reste combiné les deux méthodes, comme pour la préparation du ferro-chrome, en partant d'un mélange composé d'acide vanadique, de charbon, de fer et d'aluminium. Les deux premières substances sont introduites dans le four électrique avant l'aluminium, et, lorsque la réduction est arrivée à un certain point, on projette dans le bain de l'aluminium en poudre, ce qui achève la réaction. Comme fondant, on peut utiliser un mélange de fluorure de calcium et de chaux, ce qui donne une scorie très fusible. Ce procédé réduit de plus des deux tiers la dépense d'aluminium sans diminuer le pourcentage du vanadium uni au fer dans l'alliage.

Le *ferro-molybdène* peut être obtenu comme les ferros précédents, mais le prix de revient de la réduction limite cette préparation aux essais et recherches de laboratoire. La production, par voie aluminothermique, d'un kilogramme de ferro-molybdène à 80 $^0/_0$ exige en effet pratiquement de 420 à 460 grammes d'aluminium représentant par tonne une dépense comprise entre 1.000 et

1.200 francs de ce métal. Au point de vue économique et malgré la pureté des alliages obtenus, cette méthode ne peut donc avantageusement concurrencer les procédés électrothermiques. Ces derniers permettent en effet d'obtenir du ferro-molybdène à 80-85 % de molybdène, ce qui est très suffisant dans la pratique.

Soudure des rails. — A côté de ces applications importantes, l'aluminothermie rend aussi de grands services dans la *soudure rapide des rails*. Le procédé consiste à faire couler de l'acier doux fondu d'un creuset dans des moules en sable placés autour des joints des rails à réunir. Après nettoyage et grattage, ces derniers sont chauffés à la température du rouge, pour que l'acier coulé ne se refroidisse pas à leur contact. Le creuset, supporté par un trépied, est placé directement au-dessus du moule. Après l'avoir chargé, on y ajoute le composé aluminothermique formé d'aluminium et d'oxyde de fer en grains (*thermite*) et l'on provoque la réaction et la fusion. La réaction est la suivante :



$$3FeO + 2Al = 3Fe + Al^2O^3.$$

La chaleur produite est très intense et libère de l'acier, qui coule immédiatement au fond du creuset et de là dans le moule. En trente secondes, l'opération est terminée et, cinq minutes après, on peut enlever le moule pour le passage des voitures.

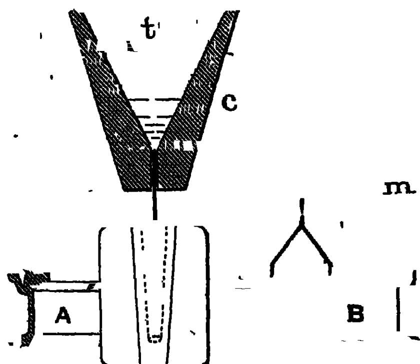


Fig. 27. — Soudure des rails par l'aluminothermie : schéma du dispositif.

On opère généralement de la façon suivante :

Les deux rails à souder A et B (*fig.* 27 et 28) sont placés bout à bout ; on peut les serrer l'un contre l'autre au moyen de vis ; vers le joint, à l'endroit où l'on doit couler la thermite, on fait une gar-

niture en terre réfractaire; on place en cet endroit un trépied formé de tiges métalliques sur lequel on met le creuset C qui contient la poudre de thermite *t*. Ce creuset est percé à la base d'un trou que l'on bouche au moyen d'une pointe métallique fixée à l'extrémité d'un levier *m*. On allume la thermite; dès que celle-ci est fondue, on donne un choc sur le levier, de façon à déboucher le creuset; le fer en fusion coule par cette ouverture et vient souder les deux rails. La scorie d'alumine qui s'est formée, étant plus



Fig. 28. — Soudure des rails par l'aluminothermie : vue d'ensemble du dispositif en fonctionnement.

légère, surnage sur le bain de fer fondu et tombe en dernier lieu du creuset; lorsque la soudure est finie, cette alumine vient couvrir le métal et empêche qu'il s'oxyde pendant le refroidissement. Le système de vis pour serrer les rails l'un contre l'autre permet de faire pression sur la soudure avant la solidification, ce qui la rend plus solide. Ce procédé de soudure est, comme on le voit, d'une grande simplicité.

De nombreuses Compagnies de tramways emploient ce procédé qui est très satisfaisant et économique par sa rapidité. On l'a du reste généralisé dans ces dernières années (*fig.* 29 et 30) et on l'emploie en outre à la réparation et à la soudure des tubes, arbres de transmission, roues dentées, au bouchage des trous, etc. Le fer

employé doit être aussi pur que possible, renfermer très peu de phosphore, de soufre et de silicium.

Le mélange de poudre d'aluminium et de bioxyde de baryum,

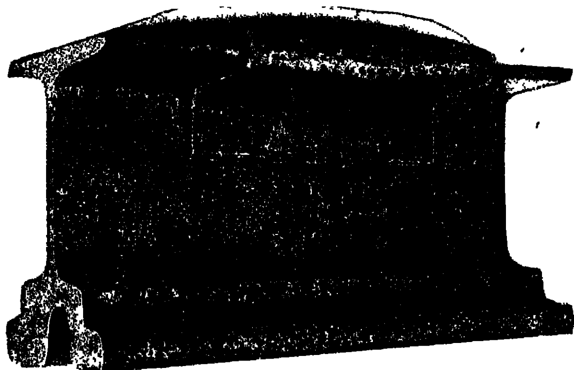


Fig. 29. — Éclissage de patin de rail en fer soudé par l'aluminothermie.

constituant en quelque sorte la cartouche d'allumage, doit être effectué avec beaucoup de précautions à l'aide d'une spatule en bois et non au mortier, afin d'éviter une inflammation subite et dangereuse. D'autre part, on doit le conserver à l'abri de l'humidité si

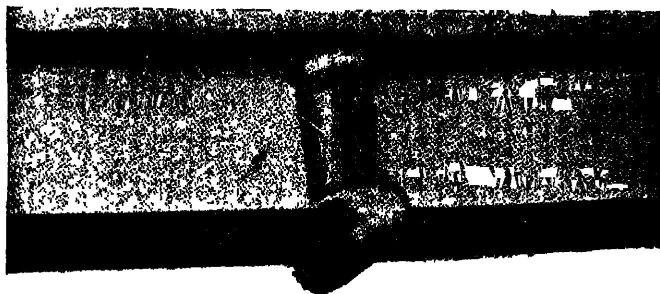


Fig. 30. — Réparation d'un rail par soudure aluminothermique.

on le prépare quelque temps d'avance, pour qu'il puisse s'enflammer au moment de l'emploi.

Chauffage des creusets. — Lorsqu'on se propose d'obtenir une température élevée, dépassant celle de la fusion du platine, en

vue d'étudier certaines réactions, on se sert généralement du four électrique. Les procédés aluminothermiques peuvent être également utilisés. En effet, si l'on veut chauffer rapidement à une température élevée, supérieure à celle de la fusion du platine, un corps quelconque, on n'a qu'à l'enfermer dans un creuset en magnésie placé dans un autre creuset ordinaire en terre, en garnissant l'intervalle des deux creusets avec un mélange d'oxyde de fer et d'aluminium auquel on met le feu par l'un des procédés connus.

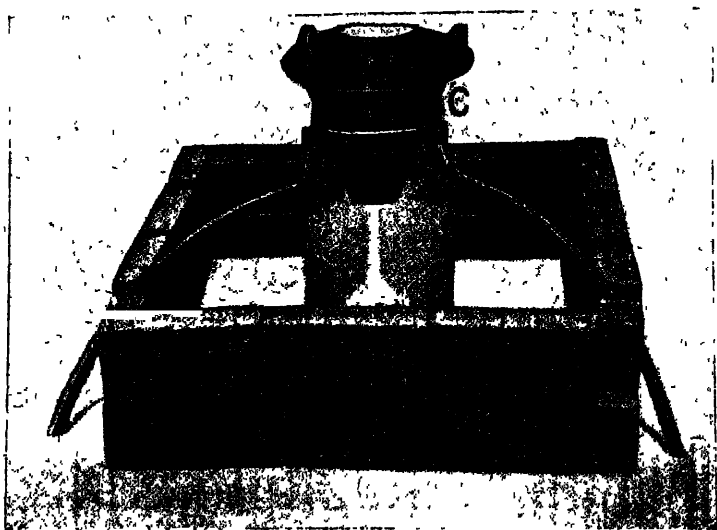


Fig. 31. — Percement d'une plaque d'acier par fusion aluminothermique.

On peut remplacer le petit creuset de magnésie par un tube de même substance traversant le grand creuset au moyen de deux ouvertures qu'on y a ménagées.

C'est donc l'application de l'aluminothermie employée non plus pour préparer des métaux réfractaires mais utilisée, à cause de la haute température qu'elle produit, au chauffage de corps étrangers.

Perforation du fer et de l'acier. — Le fer thermite s'écoulant automatiquement sur une plaque de fer a pour action de la perforer. Si l'on désire, par exemple, percer une tôle de 20 à 25 mil-

limètres d'épaisseur, on versera dans le creuset automatique C (*fig.* 31) 2kg,5 à 3 kilogrammes de thermite. On incline la tôle sous le creuset, contre une brique placée de champ. Pour recevoir le produit de la réaction qui s'écoulera, on construit une enceinte en briques, mesurant environ 75 × 75 centimètres et, sur le fond en brique, on étale une mince couche de sable sec.

L'endroit de la plaque qu'il s'agit de percer doit être posé à environ 10 ou 12 centimètres du trou de coulée. Le liquide en s'écoulant creuse instantanément dans la plaque un orifice de la grosseur du doigt, à bords nets et vifs; la plaque s'échauffe à peine par suite de la rapidité de la réaction.

Suppression des soufflures dans les lingots d'acier. — La *thermite* (mélange en parties égales d'oxyde de fer et d'aluminium, v. p. 83) permet d'empêcher la formation des soufflures, et notamment de la soufflure centrale, dans les lingots d'acier. Cette thermite spéciale est vendue en paquets dont le poids varie suivant la dimension des lingots. Son principal rôle est de réchauffer le métal de la masselotte et de lui permettre ainsi de combler les soufflures qui commencent à se former.

L'usage en est très simple : les paquets cylindriques, avec un trou qui les traverse de part en part suivant l'axe, sont attachés par un fil de fer à une barre de fer recourbée que l'on enfonce plus ou moins dans la lingotière. La réaction commence de suite, dure de cinq à six secondes, après quoi on retire la barre de fer.

Nous donnons ci-dessous le poids des paquets de thermite et celui des lingots correspondants :

Poids des lingots.	Poids de thermite.
—	—
0,5 à 1 tonne	1kg,3
1 à 2 —	2 ,5
5 —	3
9 —	7 ,5
15 —	10

Outre la disparition des soufflures, on constate la diminution des fissures dues au retrait et des liquations si fréquentes à la tête des lingots. Il semble que la thermite agisse par un brassage énergique de la masse liquide, brassage produit de bas en haut par les

produits de la réaction plus légers que l'acier liquide. Ce brassage favorise l'expulsion des gaz, contrarie la liquation et réchauffe la tête du lingot qui commençait déjà à se solidifier.

Les essais effectués sur des éprouvettes prélevées au pied et à la tête de lingots ayant subi ce traitement ont montré un allongement particulièrement satisfaisant à la tête du lingot.

Au point de vue économique, on a constaté en outre un moindre pourcentage de chute ; le prix de l'addition de thermite est donc compensé et au delà par la meilleure utilisation du lingot.

II. — Applications dans l'industrie électrique.

Lignes électriques en aluminium. — Les conducteurs en aluminium présentent, dans de nombreux cas, des avantages économiques marqués sur ceux en cuivre ; dans d'autres cas, assez rares du reste, à défaut de ces avantages, leur moindre échauffement peut constituer une propriété importante. On sait en outre que, d'une façon générale, l'aluminium peut rivaliser avec le cuivre lorsque son cours n'est pas supérieur au double de celui de ce dernier métal, condition largement remplie depuis plus de quinze ans.

Rupture des fils. — Au point de vue de l'emploi de l'aluminium comme conducteur aérien, on a craint parfois la facilité de rupture des fils sous l'influence d'arcs électriques accidentels, par suite du point de fusion peu élevé de l'aluminium et du rapide abaissement de sa tension de rupture par élévation de température. D'après Dusaugey, l'expérience courante montre que les conducteurs d'aluminium se rompent moins facilement que les conducteurs de cuivre équivalents, cela en raison de la grande chaleur spécifique du conducteur d'aluminium et de sa plus grande surface de rayonnement. L'expérience suivante le démontre :

Un conducteur d'aluminium de 109 millimètres carrés de section, soumis simultanément à une tension de 13.500 volts, à une traction de 5 kilogrammes par millimètre carré (sécurité = 4) et à un arc absorbant 500 watts, se rompt au bout de 30 minutes dans une

atmosphère calme. Un conducteur de cuivre équivalent de 62 millimètres carrés de section, soumis au même voltage, à une traction de 10 kilogrammes par millimètre carré (sécurité = 4) se rompt au bout de 25 minutes dans les mêmes conditions.

Rapport des sections des câbles en aluminium et des câbles en cuivre. — Au point de vue du rapport des sections à employer, le parallèle peut être aisément établi entre l'aluminium et le cuivre, soit à égalité de conductibilité électrique, soit à égalité d'échauffement.

La conductibilité de l'aluminium (métal écroui, commercialement pur à 99,5 %) est de 60 % par rapport à celle du cuivre électrique commercial moyen. On a donc, entre les poids de deux conducteurs nus de cuivre et d'aluminium de même conductibilité, la relation suivante :

$$\frac{\text{Poids du cuivre}}{\text{Poids de l'aluminium}} = \frac{\text{Densité du cuivre}}{\text{Densité de l'aluminium}} \times \frac{60}{100} = \frac{8,9}{2,7} \times 0,6 = 1,98.$$

Le rapport entre les sections est :

$$\frac{\text{Section aluminium}}{\text{Section cuivre}} = \frac{100}{60} = 1,67.$$

A égalité de conductibilité, la section de l'aluminium est donc 1,67 fois celle du cuivre électrique commercial. On admet 1,70 dans la pratique Au point de vue du poids, celui du câble d'aluminium n'est ainsi que les 83 centièmes de celui du câble de cuivre ayant même conductibilité, c'est-à-dire pour des sections respectives de 1.700 et 1.000 millimètres carrés. L'économie réalisée par l'emploi de l'aluminium varie ainsi entre 15 et 30 % suivant les sections.

Résistance d'isolement. — La résistance d'isolement des câbles en aluminium est un peu moindre que celle des câbles en cuivre par suite du plus grand diamètre des premiers pour une conductibilité égale. L'écart est d'autant plus faible que le diamètre est plus fort et l'épaisseur de l'isolant plus petite.

On trouve une différence de 4 à 5 % environ pour un isolant au papier de $2^{mm},75$ d'épaisseur. Cette différence est presque négli-

geable étant donnée la marge admise légalement pour la résistance d'isolement.

Échauffement. — On sait qu'un conducteur en aluminium de même conductibilité qu'un conducteur en cuivre ne subit, sous l'action du courant, que 77,5 % environ de l'échauffement du conducteur en cuivre. A égalité d'échauffement, il est susceptible de supporter une intensité de courant de 14 % environ plus élevée.

D'après cela, les câbles en aluminium peuvent supporter des surcharges supérieures à celles des conducteurs en cuivre ; les interrupteurs automatiques qui protègent les canalisations d'aluminium peuvent aussi être réglés plus haut et les coupe-circuit être d'un calibre supérieur, ce qui diminue les risques d'interruption pour excès de charge.

En règle générale, il est admis pour l'échauffement des conducteurs isolés, non souterrains, une surélévation de température ne dépassant pas de plus de 20° la température ambiante. Il existe donc, pour chaque métal, une intensité maximum qui ne doit pas être dépassée. En mettant en regard les chiffres se rapportant au cuivre et ceux concernant l'aluminium, pour des conducteurs isolés et pour des câbles sous plomb et armés, on a, pour cette intensité, les chiffres suivants :

SECTION EN MILLIMÈTRES CARRÉS		INTENSITÉ MAXIMUM ADMISSIBLE EN AMPÈRES			
		CONDUCTEURS NON ISOLÉS, SOUTERRAINS		CABLES SOUS PLOMB, ARMÉS	
Cuivre	Aluminium	Cuivre	Aluminium	Cuivre	Aluminium
10	17	43	48	95	110
25	42,5	100	136	170	193
50	85	160	182	260	295
95	162	240	275	385	440
150	255	325	370	510	580
400	680	640	730	910	1.030
1.000	1.700	1.250	1.420	1.585	1.800

Rigidité diélectrique. — Au point de vue de la *rigidité diélectrique*, c'est-à-dire de la force qu'oppose l'isolant à la perforation par l'étin-

celle, la théorie et l'expérience démontrent qu'à égalité de fatigue de l'isolant, on peut sensiblement réduire l'épaisseur de la matière isolante dans les câbles équivalents à ceux du cuivre quant à la conductibilité, c'est-à-dire de rayon $r \times 1,305$. Il y a là un important facteur de réduction dans le prix de revient des câbles armés en aluminium et une importante compensation aux conséquences de l'augmentation du diamètre. Mais dans une canalisation à courant alternatif, où les phénomènes de capacité jouent un rôle important, l'épaisseur de l'isolant devant augmenter en même temps que le rayon du conducteur, l'emploi de l'aluminium n'est plus avantageux. Par contre, pour les transports à haute tension par courant continu, il existe des cas où l'emploi de l'aluminium est moins onéreux que celui du cuivre.

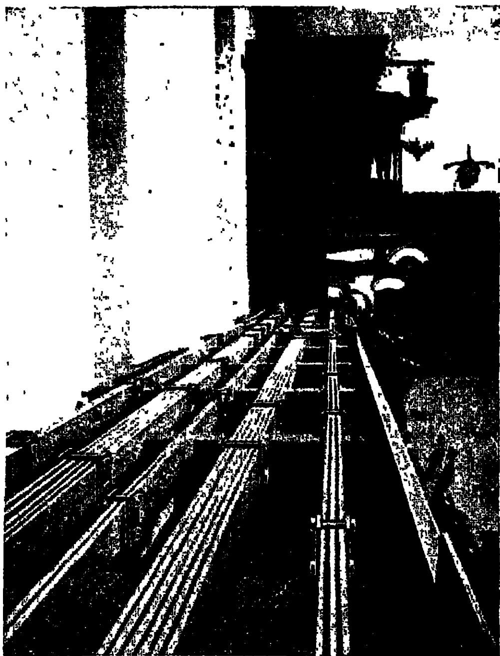


Fig. 32. — Conducteurs d'électricité constitués par des barres d'aluminium nues.

Emplois comme conducteur. — L'aluminium à l'état de fil ou de câble est utilisé non seulement pour l'éclairage, mais aussi pour les lignes téléphoniques et télégraphiques, les connexions (*fig.* 32) apparentes ou en caniveaux, leeders de réseaux de tramways et de chemins de fer, les bobines de self et tout le petit appareil électrique courant : tableaux à basse et haute tension, appareils de laboratoire et de mesure, etc.

Barres de connexion. — Dans cette application, la condition

nportante est que la température du conducteur ne s'élève pas ı delà d'une certaine limite, car à cause de la faible longueur de ›s conducteurs, la perte d'énergie est généralement très réduite. es barres en aluminium ayant une superficie de rayonnement us grande que celles en cuivre peuvent supporter une densité de ›urant plus élevée. Les connexions des barres peuvent être très en réussies avec des boulons ou par la soudure autogène.

Dans le cas des courants alternatifs, l'aluminium rend ici de us grands services que le cuivre par la diminution des courants › Foucault. Dans les mêmes conditions, ces courants sont de 40 % oindres que pour le cuivre. Ce point est important : tous ceux ıi emploient des fours électriques à courants alternatifs savent effet quels soins on doit prendre pour éviter les effets dangeux de ces courants. Aussi, dans beaucoup de fabriques d'alumium, de carbure, de ferro-alliages, les barres d'aluminium sontes couramment employées comme connexions.

Enroulements et bobinages en aluminium nu. — L'alumium se recouvre, comme nous l'avons vu (chap. I), dès la npérature de 20° C. environ, d'une couche d'oxyde qui, bien qu'à ine visible, constitue une résistance assez grande pour qu'une férence de potentiel d'environ 0,5 volt soit nécessaire pour percer. Cette propriété est utilisée dans la construction et le binage des électro-aimants, des solénoïdes, etc., avec du fil nu luminium dont les spires peuvent ainsi se toucher sans l'interśdiaire d'une couche isolante supplémentaire.

Le dépôt d'alumine peut être effectué par différents procédés. ı général, le fil est plongé dans une solution permettant d'effecer presque instantanément un dépôt très mince d'alumine dratée; cet hydrate perd son eau à 150° et devient complètement hydre vers 300°; le métal est alors recouvert d'une couche d'alune présentant une très bonne résistance d'isolement. Il peut y oir de légères irrégularités dans la couche d'oxyde, mais aux droits où cette dernière peut avoir été percée, il ne tarde pas à faire un nouveau dépôt d'oxyde.

On a observé cependant qu'à partir d'une certaine température, t 450° environ, l'isolement devient défectueux. Aussi l'emploi

du fil d'aluminium nu doit-il être limité, d'une façon générale, l'enroulement des bobines de moteurs et génératrices à basse ten sion. L'avantage le plus important consiste dans le moindre poids de bobines ; cette réduction joue un rôle utile pour les pièce mobiles où elle a pour effet de diminuer la force centrifuge. Ains un alternateur à 16 pôles de 140 kilovolts-ampères, avec exci tation normale de 30 ampères sous 120 volts, emploiera, pour se bobines de champ, du fil d'aluminium de 4,25 millimètres de dia mètre à raison de 4kg,50 par bobine; la surface de radiation par wat devra être de 3,5 centimètres carrés, tandis qu'avec du fil de cuivr de 4 millimètres il faudra 15 kilogrammes de fil et 3,4 centimètre carrés par watt. Cette réduction de poids du roton s'accentu encore du fait de la diminution de la force centrifuge et, finale ment, le prix de revient se trouve réduit de 20 % environ.

Éclairage électrique. — L'aluminium est actuellement utilis dans *certaines lampes à arc* sous forme d'électrodes ayant la form d'un L et pourvues de pointes en platine. L'écartement est régl par un mécanisme très simple. Ces lampes, dans lesquelles on fai le vide, sont d'une très longue durée, ce qui permet de justifie jusqu'à un certain point l'emploi du platine.

Dans l'air, l'aluminium donnerait un arc de coloration bleu avec auréole jaune. Il est très instable et l'oxydation des extrémi tés des deux électrodes se manifeste rapidement en engendrant un déplacement continuel de l'arc : celui-ci se porte sur les partie du métal non encore oxydées jusqu'à extinction complète. Dan l'hydrogène, on obtient une coloration rouge pourpre qui devien bleuâtre par l'allongement de l'arc ; mais celui-ci est toujours ins table et donne naissance à des dépôts grisâtres abondants ave port d'aluminium d'une électrode à l'autre.

L'arc cuivre-aluminium est également instable. Il s'allume asse facilement, mais se déplace, siffle et tend à s'allonger. Dans le voisinage du cuivre, on observe une coloration verte et l'électrod en aluminium est fortement piquée. L'arc aluminium-cuivre es encore plus irrégulier; sa coloration est celle des deux flamme réunies des métaux constituants, c'est-à-dire bleu verdâtre, mai plus nettement bleuâtre au voisinage de l'anode (aluminium) e

verte au voisinage du cuivre. Il se déplace continuellement et finalement s'éteint.

L'arc fer-aluminium donne dans l'air une flamme bleue avec auréole jaune. On constate la formation d'un important dépôt de fer sur la cathode, l'arc paraissant se maintenir aux extrémités des électrodes. L'arc aluminium-fer donne un dépôt analogue, l'usure de l'anode étant relativement faible.

Quant aux arcs charbon-aluminium et aluminium-charbon, ils se maintiennent assez bien jusqu'à une longueur de 8 à 10 millimètres, pour une intensité de 10 à 12 ampères. On constate un dépôt très net de charbon sur le métal. La flamme est de teinte bleu clair.

Dans la fabrication des *lampes à incandescence*, les fils d'aluminium ont été utilisés dans certaines usines, concurremment au platine et à l'acier au nickel, comme fils de raccord entre les filaments intérieurs et les contacts extérieurs. A cet effet, on laisse l'aluminium s'échauffer et se refroidir en ménageant autour de lui, dans le verre, un espace libre. On verse une goutte de chlorure de mercure sur le métal et, par oxydation, il se produit rapidement à la surface de celui-ci une couche d'alumine, de sorte qu'il n'existe aucun interstice vide entre le verre et l'aluminium ; de plus, les écarts de dilatation de ces deux substances sont ainsi contrebalancés et leurs effets supprimés.

Piles et accumulateurs. — La pile Cole-Barnes se compose d'électrodes formées de magnésium (pôle négatif) et d'aluminium (pôle positif). L'électrolyte est de l'aluminate de potassium. Grâce à l'emploi d'un dépolarisant convenable, la tension aux bornes atteint 2 volts.

Comme accumulateur, l'aluminium aurait l'avantage de diminuer le poids des batteries d'une façon importante et cela constituerait un facteur de premier ordre dans le développement de la locomotion électrique. On a essayé de tous côtés à résoudre le problème, mais les solutions sont encore très imparfaites. Signalons cependant l'accumulateur dans lequel, pour la formation des plaques, on emploie de l'aluminium et de l'oxyde de fer mis au contact d'une solution n'attaquant pas l'aluminium. Le poids de

l'appareil n'est que le cinquième d'un accumulateur au plomb de même capacité ; il peut en outre supporter de fortes charges et fonctionne à peu de frais.

Parafoudres. — L'élément électrolytique en aluminium, composé de deux électrodes en aluminium immergées dans un électrolyte convenable et sur lesquelles on fait déposer de l'alumine hydratée, présente la propriété importante d'être le siège d'un courant extrêmement faible tant que le voltage auquel on le soumet reste inférieur à une certaine valeur ; dès que le voltage aux bornes des éléments atteint ou dépasse cette valeur critique, le courant devient très intense et n'est plus limité que par la faible résistance intérieure des éléments. Quand le voltage est redevenu normal, c'est-à-dire redescend au-dessous de la tension critique, l'intensité reprend aussi sa valeur initiale, c'est-à-dire redevient pratiquement nulle.

L'action de la pellicule d'oxyde peut donc être comparée à celle d'une soupape de sûreté, s'ouvrant et livrant passage au courant dès que le voltage atteint ou dépasse une valeur déterminée. Il y a lieu cependant de signaler l'influence de la durée de service, de la température, de l'action de l'humidité, des intermittences dans l'utilisation de l'élément, qui influent plus ou moins sur son fonctionnement. Il y aurait, en quelque sorte, sur les électrodes une infinité de petits clapets s'ouvrant dès que la pression électrique atteint la valeur critique et livrant alors passage à un courant intense distribué également sur toute sa surface.

On a construit, d'après ce principe, un parafoudre constitué par une ou plusieurs séries de cônes ou cuvettes coniques superposées en aluminium. Chaque cuvette reçoit une certaine quantité d'électrolyte qui remplit ainsi partiellement l'intervalle compris entre deux cuvettes adjacentes. L'ensemble des cônes est ensuite immergé dans un bain d'huile remplissant une cuve en acier. Chaque parafoudre a autant de séries de cônes qu'il y a de phases à protéger dans le circuit. Dans le cas d'un circuit à point neutre non mis à la terre, on ajoute une série additionnelle de cônes, branchée entre ce pôle commun et la terre.

Redresseurs de courants alternatifs. — Il est facile de réaliser un appareil simple utilisant l'aluminium comme redresseur de courants alternatifs. Celui de Déverin comprend quatre cuves ayant chacune, comme dimensions extérieures, 10, 30 et 32 centimètres. L'électrolyte est une solution non saturée de borate d'ammonium obtenu en ajoutant du carbonate d'ammonium à une solution chaude d'acide borique. Les électrodes sont des plaques de fer et d'aluminium épaisses de 8^{mm}. Cette soupape peut supporter 6 ampères. On peut également se servir, pour alimenter une lampe à arc, d'un simple bocal d'un litre rempli d'une solution de phosphate de sodium et dans lequel plongent une électrode de plomb et une électrode d'aluminium ; dans le dernier cas, cette soupape sert à la fois de redresseur et de résistance.

III. — Applications dans l'industrie mécanique.

D'une façon générale, la construction mécanique utilise l'aluminium sous forme de tubes, profilés, barres, tôles, cornières. Les tubes et profilés peuvent être obtenus par les méthodes courantes ; ils paraissent cependant posséder des propriétés mécaniques plus intéressantes lorsqu'ils sont obtenus par tréfilage à froid. On fait passer le métal à froid à travers les filières à l'aide de puissantes presses hydrauliques qui peuvent exercer sur l'aluminium une pression de 230 kilogrammes par millimètre carré. La résistance mécanique est ainsi accrue dans des proportions remarquables : le resserrement moléculaire produit par la compression se traduit d'ailleurs par une augmentation sensible de la densité du métal. En outre, l'énorme travail auquel est soumis l'aluminium pour passer dans les filières l'échauffe à un tel point qu'il n'a pas besoin d'être recuit et qu'il accuse un allongement très satisfaisant, soit 12 à 15 %.

D'autre part, les barres et tôles d'aluminium se fabriquent par laminage depuis la tôle de 5 millimètres d'épaisseur jusqu'aux feuilles les plus minces qui rentrent dans la catégorie des papiers métalliques (v. p. 99). La tôlerie et la chaudronnerie d'aluminium remplacent, en effet, depuis plusieurs années la chaudronnerie de

cuivre dans nombre d'applications. Les tôles d'aluminium sont employées dans les constructions légères et la carrosserie.

Industrie automobile. — Dès les débuts de l'industrie de l'automobile, l'aluminium trouva des applications variées, notamment dans la fabrication des carters de moteurs et de changements de vitesse, des volants de direction, des corps de pompe. Ces emplois se sont rapidement généralisés malgré la concurrence des pièces en bronze, en laiton, en acier coulé ou en fonte malléable et ils constituent actuellement un des principaux débouchés de l'aluminium. D'après Pitaval, les principales fonderies d'aluminium s'adonnant à la fabrication des pièces automobiles se trouvent dans la Haute-Saône, la Haute-Marne, les Ardennes et les environs de Paris.

Dans la carrosserie automobile, on utilise l'aluminium en tôles pour la fabrication des caisses de voitures, surtout depuis qu'on a découvert des colorants adhérant parfaitement à ce métal. Plusieurs maisons fabriquent des roues de camions automobiles en aluminium qui sont, paraît-il, d'une grande élasticité. Dans certaines roues, les bandages sont en acier ; ceux des roues motrices sont munis de plaques d'usure également en acier, mais dans les intervalles sont fixées des lamelles en aluminium qui évitent le patinage et le dérapage en raison de la rugosité que présente ce métal dès le plus petit frottement.

Jusqu'ici on avait précisément rejeté l'aluminium dans la construction des *cylindres de moteurs* parce qu'il semblait acquis qu'il ne supportait aucun frottement. La question a été mise au point par de nombreux industriels par le frottage de ce métal sur des cylindres de moteurs ou toute autre pièce mécanique que l'on désire couler en aluminium et auxquels on veut conserver des parties frappantes en fonte, fer, acier ou bronze. On coule d'abord en fonte, sous une épaisseur de 3 à 6 millimètres selon l'alésage, un cylindre entièrement nu, sans aile ni bride de fixage. Cette pièce, ou âme, est alésée, tournée extérieurement, limée et usinée, les sièges de soupapes sont fraisés et les pas de vis terminés. La pièce, absolument saine, ainsi obtenue est placée comme noyau dans un châssis spécial dans lequel sont montées les ailettes, brides de fixage et autres organes

du cylindre. L'aluminium est alors coulé dans le moule et, en se refroidissant, frette le cylindre en donnant une pièce légère, solide et présentant les avantages suivants : 1° refroidissement des cylindres par ailettes d'aluminium frettées et suppression de la chemise d'eau ; 2° plus grandes solidité et légèreté des cylindres ; 3° examen préalable de la fonte avant l'opération du frettage, toute pièce reconnue défectueuse à l'usinage étant éliminée.

Aéronautique et aviation. — Dans la construction des dirigeables et des aéroplanes, l'aluminium est employé de plus en plus, grâce à sa légèreté et à sa résistance élevée. C'est ainsi que les dirigeables rigides et demi-rigides en emploient de grandes quantités. L'aluminium écroui présente en effet des qualités mécaniques qui peuvent le faire considérer comme un alliage différent du métal ordinaire.

Il peut aussi convenir parfaitement aux multiples besoins de la construction des aéroplanes (barres, profilés, tubes), qui devra s'orienter désormais vers la réalisation d'une plus grande robustesse des appareils.

Constructions navales. — L'industrie de la construction navale a utilisé pendant plusieurs années une certaine quantité de tôles formées d'un alliage de cuivre et d'aluminium (bronze d'aluminium). On a reconnu depuis qu'il était préférable de réserver à cet usage l'aluminium pur de première qualité. Les tôles, moulages, rivets, etc., en aluminium pur pour la construction des cabines et autres parties des grands bâtiments placées au-dessus de la ligne de flottaison dont il est important de réduire le poids pour augmenter la stabilité du navire, peuvent ainsi rendre de grands services. On a utilisé, du reste, d'importantes quantités de tôles d'aluminium pour la construction des roufles et on s'en est déclaré satisfait. Ajoutons qu'on a aussi employé avec succès l'aluminium pour la construction des barques, yachts et bateaux automobiles destinés à la navigation sur lacs, fleuves et canaux.

IV. — Papier et poudre d'aluminium.

Papier d'aluminium. — La fabrication du papier d'aluminium est d'une grande importance industrielle et pratique, vu les nombreux emplois dont il est susceptible, concurremment au papier d'étain principalement ; mais elle n'est pas exempte de nombreuses difficultés.

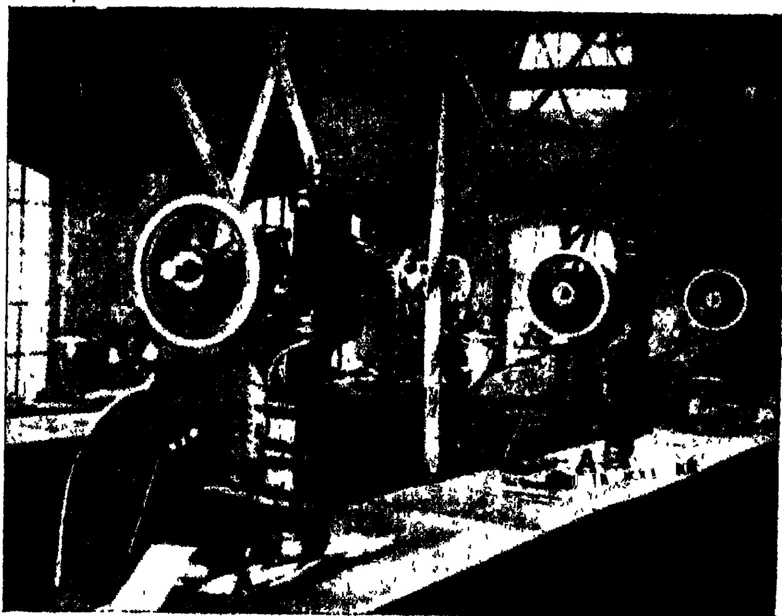


FIG 33. — Marteaux pneumatiques pour le battage de feuilles d'aluminium (A).

On part d'un lingot coulé entre 750° et 775° ; le laminage se fait à 420° environ, c'est-à-dire à la température dite du bois fumant. Aux usines de La Praz (Savoie) et de Charleval-sur-Andelle (Eure), le lingot initial a généralement 70 × 32 × 12 centimètres. Il est laminé de manière à être amené à une épaisseur de 3^{mm},5 ; on obtient ainsi une bande d'une largeur de 35 centimètres environ dont les bords ne sont pas rectilignes. On y découpe quatre bandes de 8 centimètres de largeur ; ces bandes sont recuites à 420°, puis lami-

nées à froid, l'opération du laminage comprenant en quelque sorte trois périodes : l'alimentation de la matière à travers une filière, le laminage proprement dit et l'enroulement de la matière laminée.

Ce laminage se fait en six passes jusqu'à une épaisseur de 4/100 de millimètre. Pour les épaisseurs inférieures à ce chiffre, on procède, soit par battage, soit par laminage.

a) *Procédé par battage.* — Les feuilles sont coupées à un mètre de longueur. On place les unes sur les autres 500 feuilles de 4/100 de millimètre que l'on recuit. On les bat (*fig.* 33) de façon à les amener à 3/100, on ajoute un autre paquet semblable et on les place à nouveau les unes sur les autres : on a donc 1.000 feuilles de 3/100. On les bat pour les amener à 2/100, on ajoute encore un autre paquet : on a ainsi 2.000 feuilles de 2/100 que l'on bat à 1/100. Le battage s'effectue à l'aide de marteaux pneumatiques de 150 kilogrammes donnant 300 coups à la minute ; les feuilles d'aluminium sont enserrées entre deux feuilles de zinc. Les pertes sont considérables (laminage, coupage, battage, décollage) et le rendement ne dépasse généralement pas 35 %.

Une des plus grandes difficultés est le découpage, le phénomène de la soudure autogène de l'aluminium jouant ici un rôle particulièrement néfaste. En effet, lorsqu'on découpe deux feuilles de ce métal, très serrées l'une contre l'autre par le laminage qui a chassé tout l'air interposé, on brise la mince couche d'alumine qui peut exister ; l'aluminium mis à nu se soude à lui-même d'une feuille à l'autre ou, tout au moins, se colle sous l'influence du massicot et la séparation est impossible.

Pour éviter cet inconvénient, on peut utiliser l'un des trois procédés suivants : 1° intercaler du papier ; 2° gaufrer les feuilles en les faisant passer entre deux cylindres, l'un en papier, l'autre en acier ; 3° laisser l'aluminium uni, mais l'amener mécaniquement à l'état feuilleté.

b) *Procédé par laminage.* — Les bandes sont graissées et laminées par deux jusqu'à 2/100 de millimètre et par quatre jusqu'à 1/100 (*fig.* 34). On enroule le produit laminé. Dans cette opération,

on rencontre des difficultés, la bande très mince et très longue de métal (16 mètres environ) se cassant aisément. De plus on est toujours en présence des mêmes difficultés de coupage pour l'industriel qui utilise ces bandes à la confection des empaquetages.

D'après Guillet, cette méthode paraît cependant susceptible d'une grande extension, vu qu'on utilise déjà des *machines* d'empaquetage pour le chocolat et autres produits alimentaires ; ces machines peuvent se servir de rouleaux d'aluminium sans qu'il soit nécessaire de procéder au découpage de ces feuilles au carré.

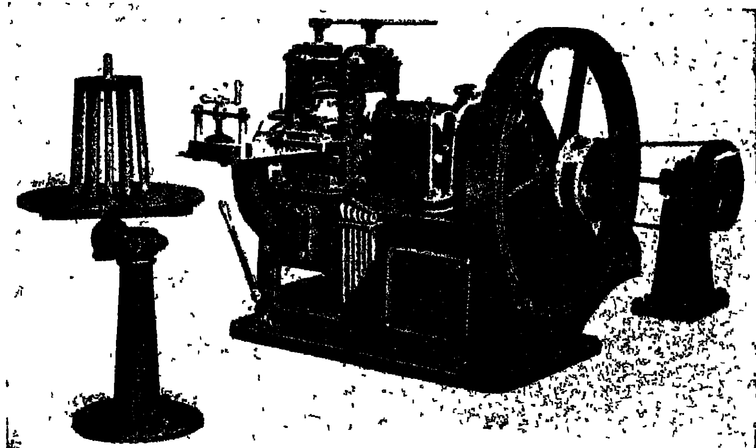


FIG. 34. — Laminoir pour la fabrication du papier d'aluminium.

Une feuille d'aluminium froissée prend une teinte tout autre que l'aluminium laminé par suite des multiples facettes irisées ainsi créées et qui donnent naissance à nombreux reflets. Cette propriété, qui n'est du reste pas spéciale à l'aluminium, peut être utilisée pour de nombreuses applications décoratives ou autres.

Nous ignorons si le *moirage* de l'aluminium est pratiqué industriellement. Son application rendrait de grands services, notamment pour la fabrication des rubans métalliques devant séjourner à l'air (palmes et couronnes mortuaires, etc.). L'obtention du moiré semble exempt de toutes difficultés pratiques avec les presses.

Poudre d'aluminium. — La poudre d'aluminium, qui est surtout utilisée pour la fabrication de la *peinture d'aluminium*, est généralement préparée à l'aide des tombées de coupe des feuilles et papiers d'aluminium. L'opération a donc pour but de désagréger ces feuilles en les amincissant de plus en plus jusqu'à les réduire en poudre. Cette dernière, examinée au microscope, est constituée par une infinité de paillettes dont l'épaisseur n'est que de quelques millièmes de millimètres, mais dont les autres dimensions sont relativement appréciables par rapport à l'épaisseur.

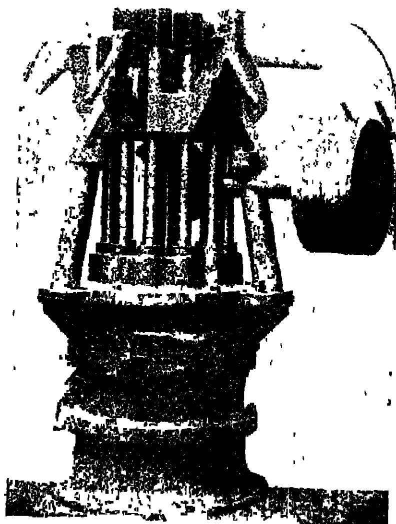


Fig. 35. — Pilon pour la fabrication de la poudre d'aluminium (grosse paillette).

Le début de la fabrication est très délicat et concerne l'emploi de pilons (*fig.* 35) qui viennent tomber, à raison de 75 rotations à la minute, dans une cuvette en couronne de construction spéciale. L'alimentation est faite d'une façon continue par un orifice communiquant avec une trémie extérieure ; la sortie s'effectue aussi automatiquement par l'intermédiaire de tamis ; ces derniers sont reliés à des boîtes à tiroirs et c'est ainsi qu'on obtient la grosse paillette.

Pour empêcher le collage des paillettes, on emploie de la stéarine que l'on râpe en poudre, mais qui est rapidement rendue fluide par la chaleur dégagée pendant le travail ; elle est introduite, à raison de 2 °/₀ seulement et en même temps que la paillette, dans les batteries successives de pilons fermés où se termine le travail. Le produit des derniers pilons donne lieu à un tamisage dans une bluterie à toile de soie.

La poudre qui a traversé la toile n° 200 est réputée finie, mais elle doit, pour être propre à ses usages, subir encore un traitement résultant d'une très fine et régulière division. Cette dernière est réalisée à l'aide de machines composées d'un cylindre dans lequel

la poudre est introduite par une tubulure, pour être brassée par un arbre vertical muni d'ailettes à sa partie inférieure. La vitesse de rotation de ces machines est calculée de façon que la poudre légère, par conséquent finement divisée, soit mise en suspension par les ailettes et vienne se fixer dans des boîtes accrochées à la paroi intérieure sur un rail hélicoïdal. La hauteur des boîtes sur

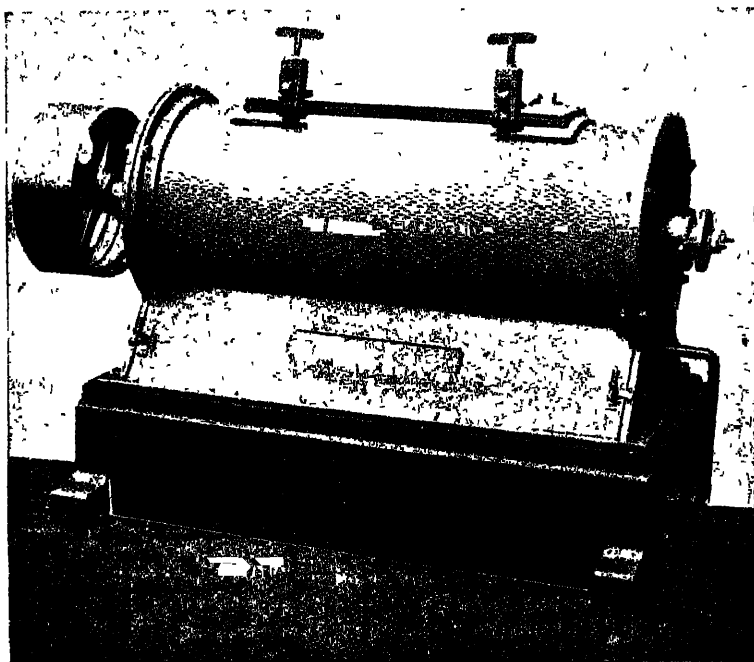


Fig. 36. — Machine à polir ou « brillanteuse » pour la fabrication de la poudre d'aluminium (d'après L. Guillet).

le rail donne un classement par légèreté, et la poudre qui se refuse à monter dans les boîtes se rend dans un tiroir inférieur d'où on la retire périodiquement; elle sert alors à amorcer les pilonnages de paillettes de l'opération précédente.

La poudre recueillie dans ces machines, dites « élévatrices », est ensuite polie pour la rendre brillante. Ce travail s'effectue à l'aide de machines appelées « brillanteuses » et composées de cylindres horizontaux en tôle striée (*fig.* 36 et 37); l'axe horizontal porte

trois brosses à 120° qui appuient sur la surface intérieure du cylindre dans toute sa longueur. Le frottement de ces brosses sur le relief des tôles amène les particules d'aluminium à se polir tant sur l'acier que sur elles-mêmes, et après dix heures de travail, la poudre est enfin finie.

Il convient d'ajouter que cette dernière opération se fait en plein air, à cause des dangers d'explosion dus à l'élévation de température provenant du frottement des brosses sur l'acier.

Les pertes de poudre sont réduites au minimum à l'aide d'une vis d'Archimède qui conduit la poudre finie dans des fûts métalliques destinés à l'expédition.

Peintures anti-rouilles à l'aluminium. — Le principal débouché de la poudre d'aluminium, actuellement, est la fabrication de *peintures anti-rouille*, qui permettent d'effectuer à froid un dépôt d'aluminium sur les constructions métalliques. La peinture d'aluminium, grâce au coefficient de dilatation élevé de ce métal, ne se craquelle pas sous l'influence de la chaleur, même à des températures très élevées. Elle sert notamment au recouvrement des conduites d'eau et de gaz, des récipients de grande dimension, des boîtes utilisées dans l'industrie alimentaire, des lignes électriques aériennes; c'est du reste grâce à cet usage que les lignes du Métropolitain de Paris doivent leur reflet métallique grisâtre. On l'emploie pour peindre par immersion les grilles en fonte des résistances électriques, les tuyaux et pots d'échappement des automobiles. On l'applique également aux installations de chauffage à vapeur et à air chaud, aux conduites de distribution d'eau chaude, radiateurs, etc. C'est une peinture véritablement métallique ne s'oxydant pas et par conséquent ne ternissant pas. De là l'utilisation de la poudre d'aluminium pour la préparation de certains vernis et enduits ignifuges destinés à recouvrir le bois et le plâtre.

La poudre d'aluminium remplace la poudre d'argent dans l'imprimerie où elle présente l'avantage d'être plus économique et de mieux adhérer au papier. La fabrication des papiers dits métallisés est du reste une véritable industrie et mérite quelques détails.

Papiers métallisés à l'aluminium. — Ces papiers, utilisés principalement dans l'industrie alimentaire, sont fabriqués à l'aide de parchemin artificiel, c'est-à-dire de papier sulfurisé ou analogue. Les feuilles étant étendues, on applique sur une des faces une légère couche de solution de résine dans un mélange de liquides volatils, tels que l'alcool ou l'éther. On accélère l'évaporation par

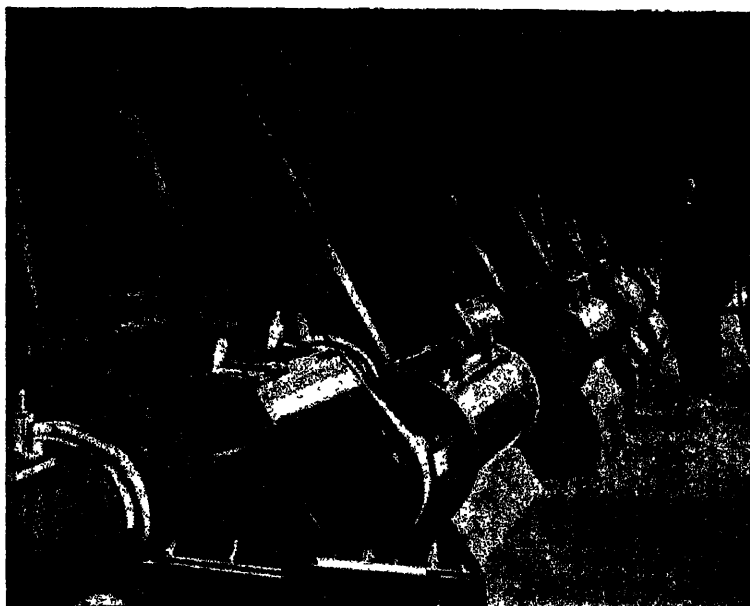


Fig. 37. — Vue d'ensemble d'une salle de machines à polir la poudre d'aluminium.

un courant d'air, puis on chauffe faiblement le papier jusqu'au ramollissement de la résine. On recouvre alors de poudre d'aluminium et l'on soumet l'ensemble à une action mécanique pour produire l'adhérence.

Les feuilles ainsi obtenues ont la souplesse des feuilles d'étain, et cela présente un grand intérêt au double point de vue commercial et hygiénique.

En effet, le papier métallisé à l'aluminium est très peu perméable à l'air et à l'humidité, ce qui permet de l'utiliser concurremment

au papier d'étain pour envelopper les substances alimentaires. Du reste, si l'étain est un métal existant généralement à l'état de pureté dans son minerai, la cassitérite, il ne faut pas oublier qu'on le retire aussi en grande partie des déchets de boîte de conserves, et que, dans ce cas, il est à redouter qu'il contienne du plomb ; d'autre part, on a souvent tenté d'ajouter du plomb à l'étain pour diminuer son prix, ce qui n'est pas sans inconvénient au point de vue de l'hygiène alimentaire.

Le papier métallisé se fabrique industriellement jusqu'à des épaisseurs très minimes ($^1/_{100}$ de millimètre) ; il possède une grande souplesse, est d'un prix très modique et se conserve presque indéfiniment.

V. — Applications diverses.

Industries chimiques et alimentaires. — Pour le *traitement* et la *conservation des liquides acides*, on emploie couramment des bacs en aluminium, notamment en ce qui concerne l'acide sulfurique et l'acide nitrique ; ces acides n'attaquent en effet l'aluminium que superficiellement et la pellicule ainsi formée protège le reste du métal contre toute attaque ultérieure. Dans l'industrie de l'acide nitrique, on utilise l'aluminium pour la construction des appareils de condensation, de refroidissement, de transport, etc. ; toutefois, il faut veiller à ce que la teneur en bioxyde d'azote de l'acide soit inférieure à 5 $^0/_0$ pour une concentration de l'acide supérieure à 65 $^0/_0$ de monohydrate ; cela revient à dire que cette teneur en bioxyde d'azote doit être moindre que celle qui, pour une concentration déterminée, correspond à une attaque de l'aluminium.

Dans la chimie des *explosifs*, l'aluminium, quoique nouveau venu, sert à la fabrication de plusieurs produits intéressants. Citons entre autres l'*ammonal*, constitué par un mélange d'aluminium et de nitrate d'ammoniaque pulvérisés. Ce mélange, enflammé à l'air libre, brûle rapidement en émettant une très vive lumière ; mais, enflammé sous pression, il explose avec force. On peut le préparer au moment même de son emploi, ce qui évite tout accident possible par sa conservation. Le *Prométhée III* est un mélange de

chlorate de potassium, d'oxyde de fer et d'aluminium en poudre ; lors de son utilisation, on l'imbibe d'un mélange d'essence de térébenthine et de phénol ; c'est un explosif ayant un pouvoir brisant considérable.

On a songé également, à l'aide de la poudre d'aluminium, à préparer l'*hydrogène*. Le procédé imaginé par Mauricheau-Beaupré consiste à mélanger intimement la limaille d'aluminium à une petite quantité de chlorure mercurique et de cyanure de potassium pulvérisé. Ce mélange, auquel on a donné le nom d'*hydrogénite*, se conserve indéfiniment à l'abri de l'humidité. Traité par l'eau, il laisse dégager environ 1.300 litres d'hydrogène par kilogramme de produit.

Il faut enfin signaler l'emploi de l'aluminium dans la *précipitation de l'argent* des bains de cyanuration. Cette réaction est mise à profit aux mines de Deloro (Canada) ; l'argent contenu dans les solutions des bacs de cyanuration est précipité, non pas au moyen de zinc comme dans le cas habituellement employé, mais par de la poudre d'aluminium en présence de la soude caustique.

Dans la cuve de précipitation, il est indispensable d'entretenir un courant central descendant, pour faire arriver au fond du bain l'aluminium en poudre qui a une tendance à surnager. Après précipitation, on fait, comme dans le procédé courant, passer le liquide dans un filtre-presse et on fond, après lavage, les résidus solides restant dans ce filtre. On obtiendrait ainsi des lingots d'argent contenant jusqu'à 99,9 °/₀ d'argent fin. Ce procédé est, paraît-il, très avantageux aussi au point de vue de la dépense de produits chimiques.

Dans l'*industrie de la brasserie*, l'aluminium est utilisé pour la construction, par soudure, des foudres et des cuves de fermentation ; il est en effet inaltérable au contact des moûts, et le nettoyage des récipients se fait avec la plus grande facilité. Les tôles d'aluminium employées à cet effet doivent être en métal très pur ; des échantillons reconnus défectueux à l'usage et analysés ensuite renfermaient 0,7 °/₀ de silicium et 0,5 °/₀ de fer.

L'oléine, qui rougit dans le fer, reste incolore dans l'aluminium ; les *acides gras*, qui se colorent facilement en vert dans les appareils en cuivre ou en gris dans les appareils en plomb, ne sont pas colo-

rés par l'aluminium. Toutefois, les acides gras volatils l'attaquent; on n'y doit donc pas travailler des graisses rances.

L'aluminium peut aussi rendre de grands services dans l'industrie des *produits pharmaceutiques*, des éthers et des essences, des huiles et des acides gras, dans la fabrication des conserves, etc.

L'emploi de ce métal est surtout indiqué dans l'industrie de l'*acide stéarique*, ainsi qu'il ressort d'essais faits par Donath, dès 1895, et suivis ensuite par Pastrovitch après une période d'essais en grand ayant duré plusieurs années; des plaques de revêtement en aluminium, qui servaient à recouvrir les plateaux en fer des presses à chaud, n'ont subi, en deux ans, qu'une diminution de poids insignifiante, 1,37 %, sans qu'aucune attaque fût visible, tandis qu'une garniture en cuivre, qui servait dans les mêmes conditions, montra une usure dix fois plus forte.

On peut dire que les *graisses* et les *acides gras* sont à peu près sans action sur l'aluminium, même à température élevée et en présence d'air, ce qui, comme on sait, rend l'attaque des métaux plus énergique. Un des grands avantages de ce métal c'est qu'en faisant les presses et les appareils de fusion et de cristallisation des acides gras en aluminium, on en diminue notablement le poids.

De même, l'aluminium pourrait servir dans les *raffineries d'huiles*, en savonnerie, dans la fabrication des huiles essentielles, la rectification des glycérines, la préparation des vernis au copal, la fabrication des conserves, confitures, gelées, marmelades, du lait condensé, dans la concentration des vins, cidres et poirés, etc.

Ajoutons que le noircissement du *cognac* dans les tonneaux par le gallate de fer à l'état de traces peut être supprimé et le liquide rendu à sa couleur initiale par immersion de lames d'aluminium pendant quinze jours dans le cognac. D'après M. Kohn-Abrest, l'aluminium décolorerait un certain nombre de rhums naturels, mais serait sans action sur les rhums artificiels.

Depuis quelque temps, on cherche à remplacer l'aluminium par de la tôle d'acier doux soudée, dont la surface extérieure ou intérieure, suivant les emplois, est recouverte d'aluminium d'après le procédé Schoop (V. p. 117); la couche protectrice ainsi obtenue est identique à la tôle d'aluminium; seule la densité du métal est augmentée.

Photographie. — Photo-poudres à l'aluminium. — On utilise depuis longtemps le magnésium en poudre comme producteur de lumière pour la photographie instantanée et, à ce titre, les qualités de ce métal sont réelles. Il possède en effet deux propriétés nécessaires à l'obtention d'une bonne lumière oxymétallique : un grand pouvoir d'oxydation et une activité chimique de lumière relativement élevée ; c'est sa facile et rapide oxydation qui fait de l'« éclair magnésique », comme on l'appelle, une lumière instantanée. Mais cette qualité a son défaut, car le magnésium, exposé à l'air humide, se transforme aisément en carbonate et ne brûle plus ; il faut donc avoir soin de le préserver de l'humidité. L'activité de sa lumière est due à la présence, dans le spectre de ce métal, de trois raies localisées dans l'indigo et le bleu (rayons de grande activité chimique), contrebalancées seulement par quatre de bien moindre importance localisées dans le vert et le jaune.

Or l'aluminium est beaucoup moins altérable que le magnésium, il ne l'est même pas du tout à la température ordinaire et la mousse d'aluminium se conserve sans qu'il soit utile de la mettre à l'abri de l'air humide. De plus, l'aluminium est d'un prix beaucoup moins élevé que le magnésium, parfois même fort difficile à se procurer. Enfin, il est le seul métal (après le calcium, très rare) possédant des raies spectrales voisines de la partie ultra-violette, alors que le magnésium n'en possède, comme nous venons de le voir, que dans l'indigo et le bleu

En comparant les résultats obtenus avec ces deux métaux, aluminium et magnésium, l'avantage se fait nettement sentir en faveur du premier; on remarque notamment qu'avec l'aluminium les colorations naturelles rouge et jaune gardent sensiblement leur valeur, tandis qu'avec le magnésium la relativité n'existe pas. Il y a donc, entre l'actinisme des deux lumières oxyaluminique et oxymagnésique, une différence considérable.

D'après ces données, on a établi différentes *photo-poudres à l'aluminium* dont l'une, due à M. Demole, présente la composition suivante :

Aluminium..................................	1 partie
Permanganate de potassium................	2 —

Le permanganate doit être finement pulvérisé et être très pur. Le mélange ci-dessus brûle alors avec facilité et rapidité; il permet donc l'instantané.

En augmentant plus ou moins le permanganate, la rapidité de combustion est diminuée, mais la fumée est beaucoup augmentée.

On emploie aussi le mélange suivant :

Aluminium	4 grammes
Chlorate de potasse	10 —

Il ne faut pas oublier cependant que ce mélange constitue un véritable explosif, et que sa préparation doit être effectuée prudemment. Les doses de produits sont d'abord versées, en deux tas séparés, sur une feuille de papier, puis mélangées lentement avec une tige de bois. En aucun cas, on ne doit mélanger ou manipuler plus de 30 à 40 grammes de mélange. Si on prévoit l'emploi d'une assez grande quantité de photo-poudre, on devra fractionner la préparation en plusieurs doses, conservées par petits paquets séparés de manière à diminuer les risques d'explosion. La durée de combustion de 1 gramme est de 1/5 de seconde. On peut l'accélérer notablement en ajoutant au mélange du sulfure d'antimoine d'après la formule:

Aluminium	$3^{gr},6$
Chlorate de potassium	10
Sulfure d'antimoine	2,2

Ce mélange est aussi dangereux à manier que le précédent et nécessite par conséquent les mêmes précautions ; 1 gramme de matière brûle en 1/17 de seconde. On peut remplacer le chlorate par le perchlorate, qui est aussi un oxydant très énergique et permet d'obtenir un mélange photogène résistant mieux au choc. La formule est la suivante :

Aluminium	10 grammes
Perchlorate de potassium	6 —

Une méthode toute différente consiste à utiliser l'aluminium seul, sous forme de *fils très fins* analogues à ceux employés dans lés coupe-circuit. Un fil de ce métal mis en court-circuit sur une ca-

nalisation électrique se volatilise immédiatement en émettant une lumière très vive et de très courte durée. Bien entendu, il convient de disposer la dérivation de la canalisation de façon à ne pas nuire à sa sécurité.

Quincaillerie et ustensiles de ménage. — Dans la petite mécanique, quincaillerie, bimbeloterie, industrie du bâtiment, les emplois de l'aluminium sont très nombreux et se multiplient chaque jour concurremment au fer, au cuivre et aux alliages blancs. Mentionnons les clefs, plaques de propreté pour portes, poignées de fenêtres, lettres pour enseignes lumineuses, pièces pour filatures et tissages, bobines, poulies, manches d'outils, fers à cheval, agrafes inoxydables, grains de chapelet, viroles, pièces de bicyclettes, etc.

Les ustensiles de cuisine et de ménage en aluminium, qui font l'unique objet de fabrication de plusieurs usines importantes, sont confectionnés en adoptant, soit le métal moulé, soit le métal estampé ; l'un et l'autre donnent de bons résultats. L'utilisation de l'aluminium à la confection des ustensiles de cuisine et de ménage n'est du reste pas une innovation, et elle est certainement la plus populaire de ce métal ; son extension considérable est justifiée par les précieuses propriétés (V. chap. I) qu'il possède. Sa haute conductibilité calorifique, sa chaleur spécifique extrêmement élevée, son faible pouvoir émissif justifient aisément le bien-fondé des assertions contenant ces applications spéciales. Malgré les griefs formulés autrefois contre les dangers de l'aluminium pour la santé, on a reconnu aujourd'hui, d'une façon définitive, que ce métal offre toutes les garanties au point de vue de l'hygiène et de la salubrité.

L'entretien (v. p. 70) et la conservation des ustensiles en aluminium sont extrêmement faciles, à condition d'observer certaines précautions comme on le fait avec la batterie de cuisine en cuivre ; la plus élémentaire précaution est évidemment de ne pas les nettoyer avec des cristaux de soude.

L'armée française a du reste depuis longtemps adopté du matériel en aluminium. Les explorateurs en font un usage constant qui a reçu la consécration d'une longue pratique.

On fabrique également des couverts en aluminium; ils sont

légers, solides et d'un usage pratique et commode. L'industrie de la laiterie fait aussi un très grand usage des *récipients* de tous genres en aluminium. Le lait frais ou aigri, les vins rouges et blancs, les solutions au dixième de chlorure de sodium, d'iodure de potassium, d'azotate de sodium, de sulfate de potassium, de chlorure de calcium, d'azotate de calcium n'attaquent pas l'aluminium pur. Par contre, la solution de bicarbonate de soude à 1/10 l'attaque ainsi que les solutions de sulfate de magnésium et de sulfate de calcium; il en est donc de même d'un grand nombre d'eaux minérales bicarbonatées sodiques et calciques.

Signalons en outre l'emploi de l'aluminium pour la fabrication des *mesures de capacité* destinées au mesurage des liquides. Il a été autorisé par un décret du 12 novembre 1908.

Emplois dans l'industrie du gaz. — La *toile d'aluminium* est utilisée pour la fabrication d'objets spéciaux, notamment des tubes souples tels que ceux employés comme conduites d'éclairage. Ce sont en général des tuyaux de caoutchouc comprimé recouverts d'une enveloppe faite d'un tissu spécial et sur laquelle on a ensuite tissé une toile d'aluminium. Cette dernière, qui est très élastique malgré sa constitution métallique, assure au tube une très longue durée et facilite en outre son nettoyage. On désigne les tubes ainsi fabriqués sous le nom de *gaine tube-aluminium*.

L'aluminium jouit, en outre, de la propriété d'être inattaquable aux vapeurs sulfureuses (acide sulfureux, hydrogène sulfuré, etc...) et aux gaz des purificateurs contenant plus ou moins de composés cyanogénés; il n'est pas altéré non plus par l'ammoniac et ses composés. On a constaté que des conducteurs en cuivre électrolytique de 50 millimètres de diamètre et 6 mètres de longueur exposés aux vapeurs sulfureuses provenant d'extinction de coke, devaient être remplacés au bout de deux ans, étant complètement corrodés. Cet inconvénient est supprimé par l'emploi de l'aluminium. Comparé au laiton, l'aluminium offre une plus grande résistance aux composés sulfurés existant dans le gaz : ce métal peut donc être substitué au laiton et au bronze, d'autant plus qu'on peut facilement le braser et le polir.

Les tubes d'aluminium de 6 à 15 millimètres de diamètre sont convenables pour les installations de gaz, en ayant soin de ne pas mettre en évidence les joints brasés dont la couleur a été altérée. On a ainsi effectué des installations plus économiques avec des tubes d'aluminium qu'avec des tubes de laiton malgré que les premiers avaient 5 millimètres de diamètre de plus que les seconds. Ces installations sont, en outre, plus rigides et de meilleure apparence; la couleur claire de l'aluminium dispense de frais de décoration. Elles jouissent enfin d'une parfaite immunité aux produits de la combustion du gaz.

Le cuivre étant rapidement attaqué par le gaz sulfureux, l'aluminium a été employé aussi pour les montures de manomètres dans les usines, ainsi que dans les appareils laveurs et purificateurs. Il serait intéressant d'essayer ce métal pour les compteurs.

Monnaies. — Une propriété assez peu connue de l'aluminium est sa *sonorité:* un lingot de ce métal suspendu à un fil et frappé par un corps dur rend un son prolongé d'une pureté comparable à celle du cristal. Cette qualité a permis de fabriquer à l'aide d'alliages (aluminium-vanadium notamment) des instruments de musique; mais elle a donné aussi l'idée d'utiliser le métal pur à la frappe d'une monnaie divisionnaire. En effet, en outre de cette propriété, l'aluminium a une durée et une ténacité comparables à celle de l'argent.

Les pièces faites de ce métal (essais à la Monnaie) s'usent moins rapidement que les pièces d'or, d'argent et de bronze. Leur inaltérabilité, quelles que soient la température, l'humidité, l'acidité plus ou moins grande des milieux dans lesquels elles circulent, enfin leur légèreté, qui permet de ne pas surcharger les porteurs qui en font un usage courant, sont autant de propriétés qui militent en faveur de leur adoption en remplacement de la monnaie de bronze. Il faut cependant tenir compte de ce fait que la densité de l'aluminium étant très faible, on doit, pour ne pas être amené à avoir des pièces de trop forte épaisseur, leur donner un diamètre suffisamment grand. En limitant à 2 et 3 grammes le poids des pièces de 5 et 10 centimes, l'épaisseur serait suffisante sans toutefois être gênante pour le maniement des monnaies d'un usage

constant; les diamètres correspondants sont de 25 et 30 milli mètres.

Le gouvernement français a proposé, il y a quelques années, la substitution de l'aluminium au bronze pour cet emploi. Une com mission a même été nommée pour la mise au point de la question qui n'est pas encore entièrement résolue. L'étude approfondie de cette réforme a permis d'en dégager des conséquences financières économiques et pratiques qui amèneront sans doute un jour ou l'autre sa solution. La propreté et la légèreté des pièces, notam ment, constitueraient un avantage très apprécié du public.

VI. — Emploi de l'aluminium recouvert de dépôts métalliques ou recouvrant d'autres substances.

Cuivrage de l'aluminium. — On a indiqué plusieurs procédés pour le cuivrage de l'aluminium. Dans celui de Lodiguyne, on emploie une anode de cuivre pur et un électrolyte constitué par de l'eau additionnée de quelques gouttes d'acide sulfurique. Quand le courant a passé pendant quelques instants, il se forme un peu de sulfate de cuivre et c'est de lui que provient le cuivre qui se dépose sur l'aluminium. Au bout d'une demi-heure, on lave bien à l'eau, puis successivement à l'aide d'une solution d'acide chlorhydrique et de soude caustique, enfin dans de l'eau pure. On répète l'opération complète plusieurs fois, jusqu'à ce que l'aluminium soit recouvert d'une couche de cuivre suffisamment épaisse.

Dans le procédé Giroux, le bain a la composition suivante :

Eau distillée	10 litres
Carbonate de sodium	210 grammes
Bisulfate de sodium	200 —
Acétate neutre de cuivre	240 —
Cyanure de potassium	240 —

On commence par dissoudre le carbonate de sodium dans 6 à 7 litres d'eau distillée chaude et on ajoute peu à peu le bisulfate. L'acétate de cuivre, finement pulvérisé, est dissous par petites quantités et en agitant fortement. Quant au cyanure de potassium,

qui a été dissous séparément dans 3 litres d'eau, on l'ajoute à la solution précédente après complet refroidissement. Le tout est brassé, chauffé et filtré.

Le décapage de l'aluminium se fait en le plongeant pendant un instant dans une solution de cyanure de potassium et en le frottant, après séchage, avec de la pierre ponce. Cette opération de décapage étant d'une grande importance, on la complète en plongeant l'aluminium dans une autre solution chaude, constituée par de la potasse dans laquelle il est laissé jusqu'à ce qu'il se forme quelques bulles gazeuses. Il est lavé à l'eau froide et dans une solution aqueuse de bichlorure de mercure et de cyanure de potassium. L'aluminium est finalement plongé rapidement dans le bain. Le courant employé est de 0,5 ampère environ sous 3 volts.

Nickelage de l'aluminium. — Le nickelage de l'aluminium a toujours été considéré comme une opération difficile; il a été récemment résolu par Canac et Tassily qui conseillent d'agir de la manière suivante :

Le décapage du métal comporte successivement : le passage dans un bain de potasse à l'ébullition suivi d'un brossage avec un lait de chaux, et le trempage pendant quelques minutes dans un bain de cyanure de potassium à 2 pour 1.000. Après passage dans chaque bain, la pièce est lavée à grande eau. Le métal subit ensuite l'action d'un bain chlorhydrique ferrugineux formé de :

Acide chlorhydrique	500	grammes
Eau	500	—
Fer	1	—

On le laisse dans ce bain jusqu'à ce qu'il prenne un aspect particulier rappelant le moiré métallique. Après un dernier lavage à l'eau, la pièce peut recevoir le dépôt de nickel par voie électrolytique. A ce point de vue, l'expérience démontre que les meilleurs résultats sont obtenus avec le chlorure de nickel : le métal résultant de ce traitement se présente avec un aspect blanc mat devenant brillant par le polissage au grattebosse.

L'adhérence du dépôt de nickel sur l'aluminium est très remarquable. On peut marteler ou plier les plaques sans qu'il se forme

de craquelures et c'est seulement par cassure de l'aluminium que celui-ci est mis à nu. Quand on parvient à soulever la couche de nickel, l'arrachement, rapidement limité, ne peut s'effectuer que si l'on exerce un effort appréciable.

L'aluminium nickelé supporte le chauffage jusqu'à la température de fusion de l'aluminium sans que le nickel se sépare.

Si l'on examine au microscope le métal décapé à l'acide chlorhydrique ferrugineux, on constate à sa surface l'existence de cellules dans lesquelles vient se fixer le nickel au cours de l'électrolyse. Il semble que le fer, en formant un réseau à la surface de l'aluminium, donne naissance à une multitude de couples favorisant l'attaque par l'acide chlorhydrique, cette attaque s'effectuant énergiquement mais irrégulièrement ; il en résulte cet aspect particulier de la surface de l'aluminium entraînant l'aptitude à fixer les dépôts galvaniques.

L'aluminium nickelé ne s'altère pas à l'air humide et résiste bien à l'action des réactifs chimiques : soude diluée, acide acétique cristallisable, sel marin en solution concentrée, appliqués à froid ou à chaud. Au point de vue du transport de l'énergie électrique, les fils en aluminium nickelé produisent un abaissement du coefficient de dilatation.

Dorure de l'aluminium. — On opère ainsi qu'il suit :

On commence par argenter le métal dans un bain composé de :

Argent....................................	20 grammes
Cyanure de potassium..........................	60 —
Eau..	1 litre

L'argent est d'abord dissous dans de l'acide nitrique sans excès, puis on ajoute le cyanure ; l'argenture se fait à froid.

Le bain d'or est préparé avec de l'or dissous à la manière ordinaire et auquel on ajoute :

Or	20 grammes
Sulfate de soude..............................	20 —
Phosphate de soude............................	660 —
Cyanure de potassium..........................	40 —
Eau..	1 litre

Ce bain doit être utilisé à la température de 20 à 25° environ.

Fer recouvert d'aluminium. — Pour recouvrir d'aluminium des feuilles de fer, plaques ou autres surfaces, de la poudre d'aluminium mélangée à un vernis spécial incolore est appliquée en couches minces sur le métal. L'application se fait à l'aide de rouleaux compresseurs ; les feuilles sont ensuite chauffées assez longtemps, dans un four à moufle, à 125° environ.

Les objets en fer qui doivent être revêtus d'aluminium sont d'abord galvanisés ou étamés et immergés ensuite dans un bain d'aluminium fondu ayant de 700 à 800° C. Dans le bain, les objets sont brossés avec des brosses d'acier. L'étain ou le zinc fond et il est remplacé par l'aluminium. Ils sont traités de cette manière deux ou trois fois dans un bain semblable, mais la plus grande partie de l'étain ou du zinc est absorbée par le premier bain.

Le revêtement d'aluminium ainsi effectué adhère parfaitement au fer ; il ne s'écaille pas, ne se ternit pas, ne se corrode pas sous l'action de l'air humide, de l'eau ou de la chaleur et il ne peut être enlevé par les moyens mécaniques courants.

On recouvre parfois aussi d'aluminium les *fils d'acier*, ce qui permet de réaliser une augmentation de 80 % de la résistance à la flexion.

Dépôts d'aluminium sur des matières quelconques. — Le procédé Schoop pour l'obtention de dépôts métalliques sur des objets quelconques s'applique particulièrement à l'aluminium et peut être considéré comme le complément des méthodes galvaniques. On sait qu'il consiste à projeter le métal fondu et pulvérisé sur les surfaces à recouvrir. La projection du métal est faite à température élevée et sous forte pression (20 à 25 kilogrammes). En sortant de l'appareil, il est réduit à l'état de poudre impalpable, à l'état de brouillard, et se trouve projeté avec violence sur la surface des objets, de sorte que les gouttelettes se déposent sous forme de pellicules extrêmement minces et compactes, les recouvrant ainsi d'une couche adhérente et solide et qui est d'une homogénéité remarquable. L'épaisseur de la pellicule peut varier de 1/50 de millimètre à quelques millimètres suivant la durée de l'opération. Dans le cas de l'aluminium, 8 à 10 secondes suffisent pour obtenir une couche de 6 millimètres d'épaisseur.

Ce procédé peut être employé pour recouvrir d'une couche d'aluminium, non seulement les métaux, mais tout aussi bien le plâtre, l'ébonite, le verre, le bois, le celluloïd, etc. On l'utilise notamment pour le revêtement des bas-reliefs, moulages et toutes œuvres de sculpture, la protection du fer et de l'acier contre la rouille (ponts, charpentes en fer), la métallisation des pièces céramiques et de verrerie d'art, le capsulage et le bouchage des flacons et bouteilles, la fabrication des vases et réservoirs en grès recouvert d'aluminium, des tubes sans soudure, la confection d'objets creux, enfin la fabrication des clichés d'impression, planches pour éditions stéréotypes, galvanos, etc.

Pour cette dernière application, le procédé de métallisation se substitue avantageusement à la méthode galvanique ordinaire applicable seulement aux surfaces conductrices.

Au point de vue de la rapidité, l'avantage est encore en faveur du procédé par métallisation. Les dépôts sont du reste très nets ; les couches peuvent être adhérentes ou non suivant le but de l'opération. La structure du métal n'est pas cristalline et semble plutôt affecter une forme amorphe.

CHAPITRE IV

BRONZES D'ALUMINIUM

Constitution. — L'aluminium forme avec le cuivre une série d'alliages intéressants dont plusieurs sont employés industriellement. On les connaît plus généralement sous le nom de *bronzes d'aluminium*, mais ils ne doivent pas être confondus avec les bronzes *à l'aluminium*, alliages ayant la composition des bronzes ordinaires (Cu-Sn) additionnés d'une faible quantité d'aluminium (V. Chap. v, p. 147).



Fig. 38 — Bronze d'aluminium à 5,5 % d'aluminium montrant le constituant η ou Al^2Cu ainsi que l'eutectique Al-Al^2Cu. Attaque à l'acide chlorhydrique. — Gross. : 50 diam.

Les bronzes d'aluminium sont formés de sept constituants principaux parmi lesquels se trouvent les combinaisons définies Al^2Cu, AlCu, $AlCu^3$ et $AlCu^4$. L'existence de Al^2Cu, AlCu et $AlCu^3$ a été signalée dès 1895 par H. Le Chatelier à la suite d'études micrographiques sur les alliages de cuivre et d'aluminium. Carpenter et Edwards ont indiqué, en 1907, le composé $AlCu^4$, et, la même année, Pouschine, en étudiant la force électromotrice de dissolution de ces alliages, a confirmé l'existence de AlCu. Les

courbes de fusibilité, de conductivité, de densité, de dilatation et la métallographie mettent aisément en évidence la présence de ces constituants dans les alliages cuivre-aluminium de composition déterminée.

Ces combinaisons ont pu être isolées et étudiées en détail par M. L. Guillet (1), quant à leurs propriétés physiques et chimiques. C'est ainsi que AlCu se présente sous l'aspect d'une très belle poudre grise, de densité égale à 5,76. Le composé Al^2Cu (*fig.* 38) a été obtenu en magnifiques cristaux affectant la forme de longues aiguilles prismatiques dont la largeur atteint parfois 2 à 3 centimètres; sa densité est 4,04. Le composé $AlCu^3$ se présente sous forme de poudre de couleur or, très nettement cristallisée; sa densité est 6,73.

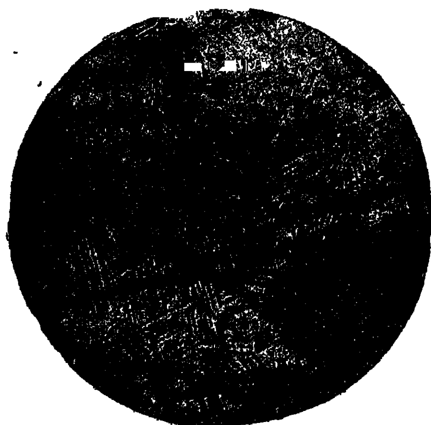


Fig. 39. — Bronze d'aluminium à 6 % montrant la solution α Attaque au perchlorure de fer en solution chlorhydrique. — Gross.: 200 diam.

L'oxygène n'attaque ces corps qu'à une température élevée, mais alors avec rapidité. L'eau ne les altère pas sensiblement même à haute température. L'acide sulfurique réagit d'autant plus facilement que le pourcentage de cuivre est plus élevé; il se produit un dégagement de gaz sulfureux et d'hydrogène avec dépôt de soufre provenant de la réduction de l'anhydride sulfureux. L'acide chlorhydrique étendu n'attaque pas $AlCu^3$, mais a une légère action sur AlCu et dissout rapidement Al^2Cu. Concentré et chaud, il réagit sur tous ces produits et d'autant plus vite que leur teneur en aluminium est plus élevée. L'acide nitrique agissant à froid dissout immédiatement $AlCu^3$ et AlCu, mais n'agit sur Al^2Cu qu'à l'ébullition. L'eau régale dissout ces composés. Un courant de gaz carbo-

(1) L. Guillet, *Contribution à l'étude des alliages d'aluminium*. Typ. Ph. Renouard, Paris

nique humide donne avec $AlCu^3$ du carbonate de cuivre, mais ne paraît pas avoir d'action sur AlCu et Al^2Cu. La potasse étendue et froide attaque rapidement Al^2Cu ; concentrée et froide, elle agit sur AlCu ; elle ne produit aucune action sur $AlCu^3$ même à l'ébullition. Vers 200°, le chlore donne du chlorure d'aluminium et du chlorure cuivrique.

Les sept constituants dont sont composés les alliages cuivre-aluminium se révèlent à l'examen micrographique :

Les alliages renfermant de 0 à 8 °/₀ d'aluminium montrent le premier constituant, ou *constituant α* de Guillet (*fig.* 39), formé par une solution cuivre-aluminium ; cette dernière apparaît en jaune or par le perchlorure de fer en solution chlorhydrique et par le chlorure de cuivre ammoniacal.



Fig. 40. — Bronze d'aluminium à 22 °/₀ d'aluminium montrant le constituant δ. Attaque à l'acide azotique étendu. — Gross. : 200 diam.

Le *constituant* β appartient surtout aux alliages renfermant de 8,6 à 14,8 °/₀ d'aluminium. Après refroidissement lent, ces derniers montrent la présence de α et β, ce dernier étant d'autant plus abondant que le pourcentage d'aluminium est plus élevé. Il apparaît en masses colorées en noir dans l'attaque au perchlorure de fer ou au chlorure de cuivre. L'alliage à 8,2 °/₀ d'aluminium n'en contient que des traces ; celui à 9,8 °/₀ Al en contient une quantité très importante ; celui à 10,5 °/₀ Al en montre sur plus des deux tiers de sa surface à l'examen micrographique.

Le *constituant* γ est caractéristique de tous les alliages renfermant de 8,6 à 11,8 °/₀ d'aluminium refroidis brusquement à une température supérieure à leur point de transformation.

Entre 11,8 et 25,5 °/₀ d'aluminium apparaît le quatrième constituant, ou *constituant* δ. C'est une solution solide (*fig.* 40).

Lorsque la teneur en aluminium dépasse 30 %, on se trouve en présence d'alliages qui, attaqués par la potasse, laissent voir de grands cristallites aux bords arrondis. A 40 % d'aluminium, ils changent de forme et prennent l'aspect de longues aiguilles ayant le même caractère. Ce *constituant* ε doit, d'après M. Guillet, être le composé AlCu.

Entre 44 et 66 % d'aluminium, on se trouve en présence du composé Al^2Cu qu'une attaque à l'acide chlorhydrique étendu fait nettement apparaître.

Enfin, pour une teneur en aluminium supérieure à 66 %, le *constituant principal* H semble être formé par de l'aluminium ou une solution aluminium-cuivre à très faible pourcentage de cuivre.

Propriétés physiques. — *Couleur.* — La caractéristique physique principale du bronze d'aluminium est sa *couleur*. L'alliage à 4 % d'aluminium possède la teinte de l'or à 14 carats, tandis que celui à 5 % a la couleur de l'or à 18 carats, c'est-à-dire qu'il est légèrement vert. Cette teinte se conserve jusqu'à la teneur de 14 % d'aluminium. Pour des pourcentages supérieurs, le bronze est gris ou blanc d'argent; le changement de coloration correspond nettement au moment où le constituant β disparaît de l'alliage.

Densité. — Elle est naturellement d'autant plus élevée que le pourcentage d'aluminium est faible. Nous donnons ci-dessous les résultats obtenus pour différents alliages préparés par union directe des éléments au creuset (aluminium à 99,65 % et cuivre électrolytique) :

ALUMINIUM %	DENSITÉ	ALUMINIUM %	DENSITÉ
0 (cuivre pur)	8,80	38,25	4,78
2,05	8,41	42,93	4,43
4,90	8,00	48,00	4,10
10,07	7,45	53,01	3,90
13,05	7,14	57,24	3,70
16,67	6,73	66,40	3,39
21,20	6,43	74,60	3,18
27,03	5,92	87,50	2,85
32,17	5,34	100 (Al pur)	2,60

Ces chiffres sont intéressants parce que, traduits par une courbe ils confirment l'existence des principaux constituants définis plus haut des alliages de cuivre et d'aluminium, notamment $AlCu^3$ et AlCu ; il y a en effet deux points d'inflexion pour des teneurs en aluminium voisines de 13 et 30 $^0/_0$ auxquelles correspondent ces composés.

Fusibilité. — Le diagramme de *fusibilité* a été établi d'abord par H. Le Chatelier, puis par Campbell et Mathews et, plus récemment par Carpenter et Edwards. Il montre (*fig.* 41) une courbe AB for-

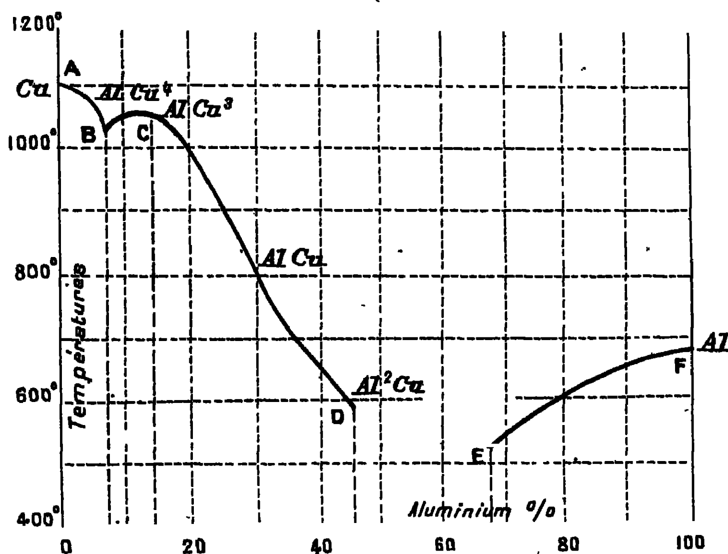


Fig. 41. — Courbe de fusibilité des alliages aluminium-cuivre.

tement incurvée, une branche BD accusant un maximum en C, et deux autres branches DE et EF. La position des constituants définis AlCu, Al^2Cu, $AlCu^3$ et $AlCu^4$, qui correspondent presque tou à des variations brusques de la température de fusion de l'alliage est nettement mise en évidence sur cette courbe.

Elle confirme d'une façon particulièrement probante cette loi de la fusion des alliages : qu'un alliage est parfois plus fusible que le plus fusible des métaux qui le composent. C'est le cas des alliages

cuivre-aluminium contenant de 40 à 95 % d'aluminium qui fondent au-dessous de 650°, point de fusion de l'aluminium pur.

Quoique facilement fusibles, les bronzes d'aluminium présentent certaines difficultés lorsqu'on les emploie pour le moulage ; ils se signalent en effet par une forte *contraction* au refroidissement. Le tableau ci-dessous donne les résultats obtenus pour des alliages contenant de 0,1 % à 12,4 % d'aluminium, entre leur point de fusion et la température ordinaire :

Aluminium.	Contraction linéaire.
0,10 %	2 %
4,05	2,08
8,12	2,33
8,67	2,34
9,90	1,83
12,40	1,83

Il convient donc de préparer les moules en conséquence, pour éviter les suites fâcheuses de cette contraction. A l'état liquide, par contre, le bronze d'aluminium remplit les moules les plus délicats, pénétrant facilement les cavités les plus fines, et se conduisant ainsi presque aussi bien que les bronzes de statuaires. Dans les pièces massives, il est néanmoins susceptible de tassement, ce qui exige l'application de jets abondants et de fortes masselottes,

Résistivité. — Au point de vue de la *résistivité électrique*, on constate les faits suivants :

1° Elle croît avec la teneur en aluminium jusqu'à 7,5 % de ce métal, alliage pour lequel elle est maximum ; elle décroît ensuite. Pour l'alliage à 94 % d'aluminium, elle se rapproche beaucoup de celle de ce métal pur ;

2° Le coefficient de température principal diminue quand la teneur en aluminium augmente, jusqu'à 10 %. A 94 % de ce métal, il est voisin de celui de l'aluminium pur ;

3° L'addition de faibles quantités d'aluminium au cuivre augmente très sensiblement la résistivité de ce métal ; par contre, l'addition de faibles quantités de cuivre à l'aluminium ne modifie qu'à peine la résistivité de ce dernier.

Ces irrégularités apparentes sont sans doute en rapport avec la présence des constituants des alliages cuivre-aluminium dont la résistivité propre modifie celle de l'alliage dans lequel ils entrent en plus ou moins grande proportion.

Voici, d'autre part, d'après M. Pécheux, les résultats obtenus avec des bronzes d'aluminium à teneurs variées en aluminium. La résistivité ρ y est exprimée en microhms-centimètre :

Al %	VALEUR DE ρ_t
3	$\rho_t = 8,26\,(1 + 0,00102\,t + 0,000003\,t^2$
5	— $10,21\,(1 + 0,00070\,t + 0,000002\,t^2$
6	— $11,62\,(1 + 0,00055\,t + 0,000002\,t^2$
7,5	— $13,62\,(1 + 0,00036\,t + 0,000001\,t^2$
10	— $12,61\,(1 + 0,00032\,t + 0,000002\,t^2$
94	— $3,10\,(1 + 0,00038\,t + 0,000003\,t^2$

Propriétés mécaniques. — Les propriétés mécaniques des bronzes d'aluminium varient suivant le pourcentage de leurs éléments, cuivre et aluminium.

L'alliage le plus intéressant est celui à 9 ou 10 % d'aluminium qui, simplement fondu, possède une résistance supérieure à celle de la plupart des corps métalliques. A ce point de vue, il présente les analogies les plus grandes avec l'acier Bessemer de Suède à 0,35 % de carbone. Comme le montrent les chiffres ci-dessous, la *ténacité*, la *limite élastique* et les *allongements* ont à peu près la même valeur et, fait assez curieux, la structure interne des deux alliages présente aussi de grandes analogies, les constituants étant dans les deux cas de dureté inégale :

	Limite d'élasticité (1)	Ténacité	Allongements
Acier à 0,35 % C.	24kg	59kg,9	26 %
Bronze d'aluminium à 9,9 % Al.	23,3	60	28,8

(1) Rappelons que la *limite élastique* à la traction est la charge maximum que peut supporter un métal sans déformation permanente, c'est-à-dire au delà de laquelle il ne peut reprendre ses dimensions primitives après suppression de la charge ; elle s'exprime en « kilogrammes par millimètre carré de section ». La *ténacité*, encore appelée *résistance à la traction*, *charge de rupture*, *résistance*

Il y a plus de cinquante ans, H. Sainte-Claire Deville avait déjà indiqué, quoique avec moins de précision, cette propriété. On l'a appliquée depuis à la confection des fusils et même des canons. On a essayé en outre le bronze d'aluminium pour la fabrication de nombreuses pièces de machines. D'autre part, en raison de sa grande finesse de grain, cet alliage peut donner des frottements très doux. Il peut être forgé à chaud à la température du rouge brun et martelé jusqu'à refroidissement, sans présenter ni pailles, ni criques, ni gerçures.

Sa *dureté* augmente avec le pourcentage d'aluminium jusqu'à une certaine limite. Entre 0 et 10 % d'aluminium, il est malléable et peu fragile ; à 11 %, il devient fragile ; à 20 %, on peut pulvériser l'alliage au mortier, bien qu'il soit très dur. La malléabilité ne renaît que lorsque le pourcentage d'aluminium dépasse 66 %, ce qui correspond à l'apparition du constituant H.

En raison de l'intérêt que peut présenter le bronze d'aluminium pour la frappe de la monnaie, il nous semble utile d'indiquer de quelle façon se modifie sa dureté par le recuit. Les chiffres ci-dessous se rapportent à des alliages livrés recuits à 850° et écrouis ensuite par martelage à froid. La dureté maximum est exprimée par le nombre 100 :

TRAITEMENT	7,5 % Al	8,5 % Al	9,75 % Al
Écroui à refus	100	100	100
Recuit à 400°	64	64	100
— 450	52	46	100
— 500	44	»	64
— 550	40	»	52

Ces chiffres montrent que l'alliage écroui à refus ne commence à perdre sa dureté par recuit qu'à partir d'une température déter-

à la rupture, est la charge maximum que peut supporter un métal sans se rompre ; elle s'exprime aussi en « kilogrammes par millimètre carré de section ». Quant à l'*allongement*, il représente la déformation maximum que peut subir un métal sous l'action d'un effort quelconque sans se briser, il correspond donc à la charge maximum de rupture et s'exprime en « allongement pour cent » ; le chiffre indiqué est le rapport du supplément de longueur du barreau, ou du fil métallique essayé au moment de la rupture, à sa longueur primitive.

minée et que le changement de la dureté se fait assez brusquement pour un intervalle limité de température.

Les bronzes d'aluminium bien exempts de silicium supportent dans de très bonnes conditions les *essais au choc*, quelquefois même mieux que l'acier moulé. La *résistance à la traction* varie dans de grandes proportions, suivant la teneur de l'alliage en aluminium. Les impuretés ou de faibles additions de nickel ou de silicium modifient en outre sensiblement les résultats. Nous donnons ci-dessous les résultats d'essais effectués par M. Guillet sur des bronzes simplement coulés :

NATURE ET COMPOSITION DE L'ALLIAGE		RÉSISTANCE à la RUPTURE	LIMITE ÉLASTIQUE	ALLONGEMENT
Alliages riches en aluminium.	100 % Al (Al pur).......	9kg,4	3kg	7 %
	99....................	10 ,3	3 ,5	5
	97....................	12 ,0	4 ,9	5
	96....................	12 ,9	5 ,2	6
	94....................	13 ,6	5 ,2	2
Alliages riches en cuivre.	3 % Al..............	20 ,9	7 ,9	36
	5....................	23 ,9	8 ,4	53
	7....................	25 ,4	9 ,1	66
	10....................	30 ,5	16 ,9	6

Voici, d'autre part, les résultats obtenus par le même auteur sur des alliages *laminés :*

NATURE ET COMPOSITION DE L'ALLIAGE	RÉSISTANCE À LA RUPTURE	LIMITE ÉLASTIQUE	ALLONGEMENT
Aluminium pur recuit..........	9kg,6	6kg,2	29 %
— — écroui.........	11 ,2	5 ,1	11
97,5 % Al recuit............	19 ,8	6 ,3	11,5
96,4 % Al —	21 ,4	6 ,6	20
8,05 % Al —	46 ,2	42 ,9	43
7,77 % Al —	43 ,4	34 ,7	54

Influence de la trempe et des traitements thermiques. — La *trempe* agit en augmentant la résistance à la rupture et les allon-

gements. Avec les alliages bruts de coulée, les allongements, par le seul fait de la trempe, atteignent parfois 80 %. Ce chiffre est seulement dépassé par certains aciers à fer γ et les aciers riches en manganèse. Il s'explique par cette considération que la trempe n'apporte aucun changement visible dans la constitution micrographique de ces alliages; son action se borne ainsi à rendre ceux-ci plus malléables, plus homogènes et à augmenter par suite leur limite d'élasticité. L'alliage à 93,13 % Cu et 6,70 % Al donne, après trempe, à 400° sur barres coulées :

Résistance à la rupture	20kg,7
Allongement	70 %

Non trempé, il donne :

Résistance à la rupture	24kg,7
Allongement	49 %

Étant donné le développement actuel des emplois du *bronze d'aluminium à* 10 % Al, il paraît utile de connaître comment agissent sur cet alliage des traitements thermiques variés. Les fig. 42 et 43 représentent, d'après Matweeff, la structure micrographique du bronze à 9,75 % d'aluminium recuit avant forge et trempé à 850°. Nous donnerons d'autre part les résultats des importants essais effectués par Portevin et Arnou (1) sur deux bronzes ; l'un (N° 1) contenant 90 % de cuivre et 10 % d'aluminium ; l'autre (N° 2) dans lequel on a remplacé 1 % de cuivre par 1 % de



Fig. 42. — Bronze d'aluminium à 9,75 % d'aluminium, recuit avant forge. — Gross. : 45 diam.

(1) A. Portevin et G. Arnou, Le traitement thermique du bronze d'aluminium à 10 % d'aluminium (*Revue de métallurgie*, mars-avril 1916, p. 103-115).

manganèse. Ces deux alliages avaient la composition suivante :

	N° 1	N° 2
Cuivre	89,94 %	88,80 %
Aluminium	9,95	10,02
Manganèse	0	1,11
Zinc	0,11	0,05
Silicium et fer	Traces	Traces

Ils ont été amenés par laminage à l'état de tôles de 10 millimètres d'épaisseur. On a étudié les points suivants : *a*) l'influence de la température de trempe avec durée de chauffage constant ; *b*) l'influence de la température de recuit après trempe à 800° ; *c*) l'influence de la température de recuit après trempe à 900°. Pour chacun de ces traitements, on effectuait des essais de traction, de choc, de dureté et un examen micrographique. On a obtenu ainsi les résultats suivants :

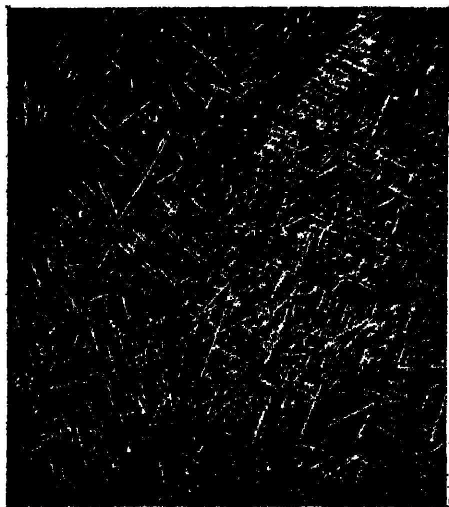


Fig. 43. — Bronze d'aluminium à 9,75 % d'aluminium, trempé à 850°. — Gross. : 45 diam.

a) *Influence de la température de trempe.* — Par trempe à 500°, les propriétés mécaniques ne sont pas modifiées. La modification s'opère entre 500 et 600°. Les propriétés mécaniques sont fonction de la température de trempe jusqu'à 900°. La trempe à 600° et 700° amène un accroissement des valeurs de toutes les caractéristiques mécaniques ; les propriétés de l'alliage sont donc nettement améliorées. Pour des températures de trempe supérieures à 800° et 900°, on accroît notablement la charge de rupture et la dureté, mais les allongements diminuent.

b) *Influence du revenu et du recuit après trempe à* 800°. — On constate un accroissement de la dureté et de la charge de rupture par revenu à 400°, mais une légère diminution correspondante des allongements. On note aussi une amélioration très marquée des propriétés mécaniques par recuit vers 600 et 700° après trempe, vis-à-vis de celles après recuit complet initial en métal laminé.

c) *Influence du revenu et du recuit après trempe à* 900°. — Les résultats précédents sont encore plus nettement accentués. L'accroissement de dureté par revenu à 400° est très accusé. Le bronze N° 2 a un allongement relativement élevé par recuit vers 600-700°, soit 21,1 à 25,1 %, alors qu'il n'est que de 12 % à 500° et de 1 % à 400°.

La micrographie est d'accord avec ces diverses modifications (*fig*. 44 à 47). Elle montre une différence de structure très nette, à égalité de constitution, entre les bronzes d'aluminium *trempés* à des températures différentes (*fig*. 44 et 45) et ceux *recuits* après trempe à des températures également différentes (*fig*. 46 et 47). Il n'y a pas modification de la structure par *trempe à* 500° et on voit nettement (*fig*. 44) les deux éléments de l'eutectoïde. Par *trempe à* 900°, l'alliage est entièrement formé du constituant martensitique dont les aiguilles se détachent nettement en blanc tout en laissant bien marqués les joints des grains de la solution solide β stable à haute température (*fig*. 45) ; ces aiguilles se coupent obliquement ou normalement. Cette structure est à peu près semblable à celle de la micrographie représentée par la fig. 43.

Par *recuit à* 700° *après trempe à* 800°, la séparation de la solution α s'effectue partie en accroissant les dimensions des éléments α subsistant après trempe, partie sous forme aiguillée entre lesdits éléments ; en même temps, le contour des aiguilles tend à s'arrondir (*fig*. 46). Par *recuit à* 700° *après trempe à* 900°, les éléments de l'eutectoïde se multiplient et augmentent de finesse (*fig*. 47).

C'est à ces différences de structure que correspondent celles constatées dans les propriétés mécaniques.

En résumé, un traitement thermique de trempe suivi de recuit améliore très nettement les propriétés mécaniques du bronze

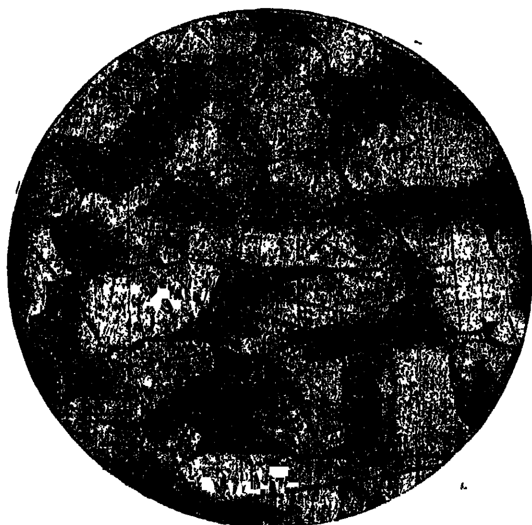


Fig. 44. — Bronze d'aluminium à 10 $^0/_0$ Al : trempe à 500°.
Gross. : 300 diam.

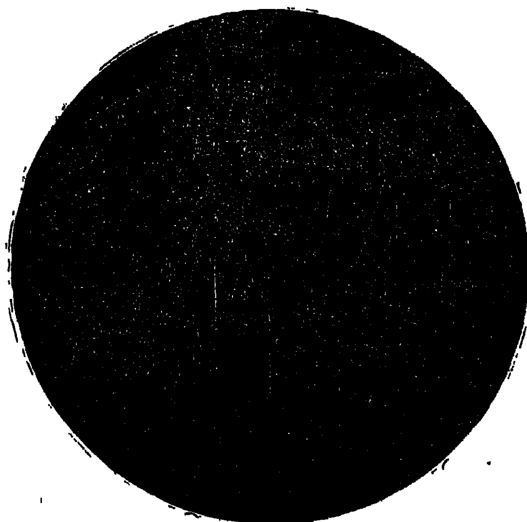


Fig. 45. — Bronze d'aluminium à 10 $^0/_0$ Al : trempe à 900°.
Gross. : 200 diam.

d'aluminium à 10 % Al laminé; cette amélioration est plus marquée dans le bronze renfermant 1 % de manganèse. Ces résultats permettent de trouver en pratique, par un très petit nombre d'expériences préalables, le meilleur traitement thermique industriel à faire subir à ces alliages en vue d'atteindre des qualités mécaniques maxima.

Influence de la température. — La variation, avec la température des propriétés mécaniques des bronzes d'aluminium, n'est pas encore exactement connue ; elle a cependant fait l'objet de plusieurs mémoires, mais les résultats ne concordent pas; ils sont même parfois contradictoires. En 1902, M. Webb fit des essais suivis sur l'alliage à 7 % d'aluminium destiné à la fabrication des entretoises de locomotives. Les résultats furent déplorables : après deux mois seulement de service et 400 kilomètres de parcours, les entretoises se rompirent au niveau de la tôle porte-tube. D'après l'auteur, la ténacité de cet alliage diminue de 50 % à la température de 300°. Cependant des expériences plus récentes n'ont pas donné une chute de résistance aussi accentuée. Voici, d'autre part, les résultats obtenus pour différents alliages de composition différente, portés à la température de 400° :

Al %	RÉSISTANCE A LA RUPTURE	ALLONGEMENT
8,12	32^{kg},8	25 %
9,90	35 ,5	36
10,78	34	30
11,73	29	62

Après la rupture, les extrémités des deux fragments de l'alliage à 11,73 % Al avaient la forme de pointes effilées, ce qui, avec l'allongement considérable noté, soit 62 %, témoigne d'une remarquable élasticité.

Les chiffres ci-dessous, qui sont des moyennes d'expériences, se rapportent à un bronze à 6,73 % d'aluminium laminé et porté graduellement de la température ordinaire à 500° :

TEMPÉRATURE	RÉSISTANCE A LA RUPTURE	ALLONGEMENT
Ordinaire	45kg,4	71,0 %
250° C.	37 ,3	27,2
300	32 ,3	24,7
350	30 ,5	17,5
400	28 ,3	16,0
450	21 ,0	9,5
500	17 ,2	14,0

On voit, par ces chiffres, que la ténacité et l'allongement décroissent tous deux régulièrement à mesure que la température s'élève. D'une façon générale, la décroissance de la ténacité est d'autant plus considérable, pour les alliages de 6 à 10 % d'aluminium, que la durée de chauffage avant la rupture a été plus prolongée. Avec l'alliage à 9,90 % Al laminé, les allongements de rupture restent cependant sensiblement constants (29 à 32 %) jusqu'à 450°, augmentent notablement à 500° (75 %) et diminuent ensuite brusquement à 550° (11 %).

Résistance à la corrosion. — A côté des propriétés mécaniques, une des qualités les plus importantes et les plus appréciables de certains bronzes d'aluminium est leur *résistance chimique* ou *résistance à la corrosion*. Cette précieuse qualité les rend aptes à la fabrication d'objets destinés aux usages domestiques et maritimes. Différents essais effectués à ce sujet ont montré que les alliages renfermant de 3 à 10 % d'aluminium, immergés dans l'eau de mer isolément, se comportent un peu mieux que le *métal Muntz* (Cu-Zn-Sn) et que le *laiton naval* (laiton à 2 % Sn). Mis en contact avec l'acier, ils n'éprouvent aucune altération après quatre mois.

Voici, d'autre part, les résultats obtenus avec des bronzes renfermant une forte proportion d'aluminium :

ALUMINIUM %	PERTE DE POIDS PAR CENTIMÈTRE CARRÉ
100 % (Al pur)	4 milligrammes
99,07 %	4 —
97,73	3,5 —
96,26	2,5 —
94,66	2,0 —
95,26	1,5 —



Fig. 46. — Bronze d'aluminium à 10 $^0/_0$ Al : recuit à 700° après trempe à 800°. — Gross. : 450 diam.



Fig. 47. — Bronze d'aluminium à 10 $^0/_0$ Al : recuit à 700° après trempe à 900°. — Gross. : 200 diam.

Les chiffres indiqués dans la colonne de droite représentent la perte, en milligrammes, par centimètre carré pendant 30 jours. Comme on le voit, l'attaque est assez rapide ; on observe même le dégagement de petites bulles gazeuses, et il se forme autour des plaques mises en expérience un dépôt gélatineux d'alumine. Cette altération assez rapide montre l'impossibilité d'employer à la mer les alliages riches en aluminium Il y a quelques années, le Gouvernement français, ayant fait fabriquer des tôles marines en bronze d'aluminium à haute teneur en aluminium, ne fut pas satisfait des résultats obtenus, malgré la solidité et la légèreté de la construction ; l'action de l'eau de mer avait amené la perforation rapide des tôles partout où la peinture se trouvait éraillée.

Le bronze à 10 % d'aluminium a donné au contraire, pour les constructions maritimes, des résultats remarquables. De nombreuses hélices, construites pour l'Amirauté anglaise, ont toujours satisfait aux conditions de ténacité, de limite élastique et d'allongement en même temps qu'elles présentaient une résistance énergique à l'attaque par l'eau de mer. Les chiffres ci-dessous permettent de s'en rendre compte par comparaison avec d'autres métaux et alliages :

	Perte de poids par cm^2 en un mois.
Fer	$4^{mmgr},5$
Cuivre	1 ,3
Bronze à 1 % Al	1 ,2
Métal Muntz	0 ,7
Bronze à 10 % Al	0 ,4

Des essais effectués en constituant des couples par la réunion de deux métaux, dont un était du bronze à 10 % Al, ont montré que ce dernier ne manifeste aucune attaque appréciable lorsqu'il se trouve pendant une longue période en contact avec le fer ou le *métal Muntz* ; ces derniers sont au contraire très altérés.

Au point de vue des usages domestiques, les alliages renfermant une très faible proportion d'aluminium éprouvent dans l'eau pure une attaque très légère, alors que cette dernière est nulle pour le *métal Muntz* et le *laiton naval*. Les essais effectués dans le but de se rendre compte de la possibilité d'employer ces alliages pour les usages culinaires ont montré que l'eau ordinaire additionnée d'a-

cides organiques bouillants n'attaque pas sensiblement les bronzes à haute teneur en aluminium. Les chiffres contenus dans le tableau suivant permettent de s'en rendre compte. Ils se rapportent à des expériences faites à l'aide de plaques immergées pendant 6 heures dans des solutions bouillantes d'acide oxalique à 1 $^0/_0$, d'acide acétique à 1 $^0/_0$ et d'acide citrique à 2 $^0/_0$:

ALUMINIUM $^0/_0$	EAU BOUILLANTE ORDINAIRE	AC. OXALIQUE A 1 $^0/_0$	AC. ACÉTIQUE A 1 $^0/_0$	AC. CITRIQUE A 2 $^0/_0$
100 (Al pur)	Perte nulle	$0^{mmgr},5$	$0^{mmgr},1$	$0^{mmgr},05$
98,43	»	0 ,9	0 ,1	0 ,1
97,64	»	1 ,0	0 ,05	0 ,1
96,36	»	1 ,0	0 ,1	0 ,1
95,36	»	1 ,1	0 ,1	0 ,1
94,66	»	1 ,2	0 ,15	0 ,15

La concentration des solutions d'acide oxalique et d'acide citrique indiquée ci-dessus est la plus forte que l'on puisse rencontrer dans les aliments. Les chiffres inscrits représentent les pertes en milligrammes par centimètre carré pendant 1 heure à l'ébullition.

Fabrication. — *1° Union directe des deux éléments.* — Le procédé le plus simple et le plus généralement employé pour la préparation du bronze d'aluminium consiste dans l'union par fusion des deux éléments de l'alliage, cuivre et aluminium. Différentes précautions sont néanmoins nécessaires pour obtenir des alliages sains, bien fondus, exempts de traces d'oxydes et pour éviter de trop grandes contractions pendant le refroidissement.

Pour la préparation du bronze à 10 $^0/_0$, qui est le plus employé, on part d'un mélange de 90 $^0/_0$ en poids de cuivre et 10 $^0/_0$ d'aluminium. Comme il ne se perd que très peu de ce dernier métal pendant l'opération, il n'est pas nécessaire d'en mettre une quantité très supérieure au pourcentage désiré. Pour des fusions demandant une grande exactitude, on se contente de 0,2 à 0,3 $^0/_0$ en plus.

Le cuivre employé doit être de très bonne qualité, du cuivre pur électrolytique de préférence. L'aluminium doit être également très

pur, à 99,5 % si possible. On commence par fondre le cuivre dans un creuset en graphite, en prenant soin de recouvrir le métal de charbon de bois pour éviter l'oxydation au contact de l'air. Après la fusion du cuivre, qu'on constate au moyen d'une tige de fer ou de graphite, on ajoute l'aluminium. Après sa fusion, celui-ci se porte à la surface du bain ; dès que le mélange est porté au rouge blanc, on l'agite à l'aide d'une tige de graphite : le bronze d'aluminium se forme de suite.

Pour couler l'alliage, on recommande, en général, de ne pas l'utiliser directement, mais de lui faire subir deux fusions afin d'augmenter ses qualités mécaniques. On élimine ainsi l'alumine qui reste en suspension dans le métal fondu et qui, pendant la seconde coulée, reste à la surface du bain et n'est pas entraînée ainsi avec l'alliage. Pour éviter l'introduction des crasses dans le moule ou la lingotière, on coule du reste généralement dans une poche intermédiaire dont le fond est muni d'un bouchon que l'on enlève au moment où toutes les pellicules d'oxyde ont remonté à la surface.

C'est à la réduction de l'oxyde de cuivre dissous dans le bain et réduit par l'aluminium qu'est dû le grand dégagement de chaleur constaté au moment où l'on ajoute l'aluminium au cuivre fondu; il ne provient pas, comme on l'a parfois supposé, de la formation d'une combinaison cuivre-aluminium. C'est pour éviter cette surchauffe qu'on part souvent, pour la préparation des alliages à faible teneur en aluminium, d'un alliage à 50 % auquel on ajoute la quantité d'aluminium nécessaire. L'alliage à 50 % présente en outre l'avantage de donner des bronzes plus homogènes que ceux obtenus directement à partir des deux éléments, l'aluminium et le cuivre présentant une grande différence de densité. Il est en effet très fragile et peut ainsi être divisé en petits fragments, ce qui facilite les opérations sur de petites quantités de matière.

Pour les alliages riches en aluminium et les moulages de grande dimension, les hélices par exemple, la double fusion n'est pas indispensable parce qu'en opérant sur de grandes masses les chances d'erreur dans les dosages sont très faibles. Mais un des points les plus importants pour l'obtention de bons alliages est le choix d'une température de coulée convenable. Bien peu de fon-

deurs, malheureusement, s'en rendent compte et obtiennent ainsi difficilement des alliages sains. On est cependant obligé d'atteindre une température dépassant de 50° environ le point de fusion de l'alliage. On coule habituellement à 700° les alliages riches en aluminium, dont le point de fusion est un peu inférieur à 650°. La ténacité, la limite élastique et les allongements se trouvent augmentés dans une grande proportion par ce seul fait.

Le moulage en lingot métallique des bronzes d'aluminium présente l'avantage d'activer le refroidissement et, par suite, d'entraver la cristallisation, ce qui donne un alliage à texture très fine; sa cassure présente un aspect soyeux et des grains très serrés qui augmentent ses qualités mécaniques, notamment la résistance et l'allongement.

Le moulage en sable est assez délicat à cause du retrait. Le sable sec convient mal; il est trop dur et ne permet pas au moulage de se contracter sans donner lieu à la formation de craquelures. Le sable vert, par contre, est doux et n'a pas d'influence fâcheuse sur la contraction.

2° Réduction de l'oxyde de cuivre par l'aluminium. — M. Guillet a préparé, au laboratoire, toute une série de bronzes d'aluminium en réduisant l'oxyde de cuivre par l'aluminium, d'après la méthode aluminothermique. L'oxyde de cuivre CuO, très pur, est mélangé en proportions déterminées à de l'aluminium en grains fins, mais non en poudre, cette dernière donnant lieu à des réactions trop vives et pouvant provoquer des explosions. La réaction peut être représentée par l'équation chimique suivante :



$$3n\mathrm{CuO} + (2n + 3m)\mathrm{Al} = 3\mathrm{Cu}^n\mathrm{Al}^m + n\mathrm{Al}^2\mathrm{O}^3.$$

Dans cette préparation, on est limité par la non-inflammabilité du mélange. Plus on ajoute d'aluminium, plus on diminue sa vitesse d'inflammation et, pour une certaine quantité de ce métal, il n'y a même plus du tout inflammation. La limite est atteinte pour l'alliage $\mathrm{Al}^4\mathrm{Cu}$.

3° Réduction électrothermique et électrolytique de l'alumine par le carbone en présence du cuivre. — Cette méthode a pendant

longtemps été appliquée industriellement et constitue la base du procédé Cowles.

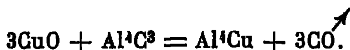
Nous avons vu précédemment (chap. I) que la production de l'aluminium par réduction de l'alumine à haute température n'était pas pratiquement réalisable. Mais en présence d'un métal tel que le cuivre, assez fixe pour ne pas se volatiliser sensiblement à la température nécessaire à la réduction, il n'en est plus de même ; non seulement le cuivre absorbe les vapeurs d'aluminium, mais il empêche ce dernier de passer à l'état de carbure.

L'appareil employé est un four rectangulaire, brasqué intérieurement avec un mélange de charbon de bois et de chaux. Les électrodes consistent en baguettes de charbon réunies à une masse commune ; elles pénètrent dans le four par deux côtés opposés et sont légèrement inclinées sur l'horizontale. La charge consiste en un mélange de corindon (ou de bauxite), de charbon et de grenaille de cuivre ; on la recouvre de charbon de bois et d'une plaque de fonte formant couvercle et munie d'ouvertures pour le dégagement des gaz pendant l'opération. Celle-ci dure près d'une heure et demie pour des fours ayant environ $1^m,50$ de longueur et $1^m,50$ de profondeur. Elle permet d'obtenir des bronzes renfermant de 9 à 11 % d'aluminium.

Dans le procédé Héroult, l'alumine est électrolysée et fondue par le courant dans un four à électrode verticale en charbon. Au début de l'opération, on introduit d'abord le cuivre, en petits fragments, dans la cavité du four ; puis on abaisse l'électrode ; le courant passe et fond le métal. Dès que le bain de cuivre constituant le second pôle ou électrode fixe est obtenu, on introduit de l'alumine dans le four et on remonte un peu l'électrode verticale. Le courant passe alors à travers l'alumine qu'il fond et décompose. L'aluminium se sépare de sa combinaison oxygénée et s'unit au cuivre : le bronze d'aluminium est ainsi formé directement. L'oxygène libéré de l'alumine se rend à l'électrode de charbon et donne naissance à de l'oxyde de carbone qui vient brûler à la partie supérieure du four. La consommation d'électrode est donc assez importante.

Pour assurer la continuité de l'opération, il suffit d'alimenter le four continuellement à l'aide d'un mélange de cuivre et d'alumine. Un trou de coulée ménagé à sa partie inférieure permet d'évacuer l'alliage et de le recueillir dans des lingotières.

4° Réduction de l'oxyde de cuivre par le carbure d'aluminium. — C'est le procédé de Prings. A une température peu élevée, il y a formation d'alumine, d'acide carbonique et de cuivre métallique ; mais à une haute température, telle que celle du four électrique, on obtient un alliage de cuivre et d'aluminium d'après la réaction suivante :



$$3CuO + Al^4C^3 = Al^4Cu + 3CO.$$

Nous ne pensons pas que cette méthode ait déjà été appliquée industriellement.

Emplois du bronze d'aluminium. — Possédant à la fois des propriétés mécaniques remarquables, une très grande résistance aux agents chimiques et une très belle couleur se rapprochant de celle de l'or, le bronze d'aluminium aura certainement dans un avenir très prochain de nombreuses applications. L'échec des premières tentatives faites il y a un demi-siècle par H. Sainte-Claire Deville doit être attribué au prix de cet alliage, qui valait alors 32 francs le kilogramme. Actuellement il ne dépasse guère celui du cuivre et coûte moins cher que le nickel tout en ayant un plus bel aspect. D'après H. Le Chatelier, le discrédit dans lequel cet alliage est tombé pendant plus de 30 ans tient d'abord à quelques erreurs des fabricants, en particulier à la mise en vente d'un alliage ne titrant que 5 °/₀ d'aluminium et se vert-de-grisant comme le cuivre ; il est dû aussi à l'opposition des fabricants d'aluminium pur qui se sont toujours montrés très hostiles au développement du bronze d'aluminium qu'ils craignaient, sans raison, devoir concurrencer les alliages légers à 80 ou 90 °/₀ d'aluminium. Mais l'obstacle le plus sérieux, actuellement, est la difficulté d'obtenir des alliages sains ; le retrait considérable à la solidification et le dégagement de gaz sont des inconvénients importants. Cependant, ils sont moindres que pour l'acier, et comme ils n'ont pas arrêté le développement de ce métal, il n'y a pas de raison, semble-t-il, pour qu'ils s'opposent à celui du bronze d'aluminium.

Actuellement, on peut distinguer, au point de vue de leurs applications industrielles, deux sortes de bronzes d'aluminium :

1° Alliages riches en cuivre. — Ils renferment de 1 à 10 °/₀ d'alu-

minium et sont connus, commercialement, sous le nom de bronzes d'aluminium. Ils répondent généralement à l'une des trois compositions suivantes :

	N° 1	N° 2	N° 3
Cuivre.......	95 à 96 %	92 à 93 %	89 à 90 %
Aluminium...	5 à 4	8 à 7	11 à 10

Au-dessous de 4 % on a malheureusement un alliage qui s'altère presque aussi rapidement que le cuivre et les laitons ordinaires ; d'autre part, au-dessus de 8 %, il y a toujours à craindre les soufflures qu'on peut éviter, du reste, par une bonne conduite de l'opération de fusion.

2° *Alliages riches en aluminium.* — Ils se rattachent aux deux types suivants :

	N° 1	N° 2
Cuivre.............................	3 à 6 %	2 %
Aluminium....................	97 à 94	98

Ils sont généralement vendus comme aluminium et servent surtout pour les constructions mécaniques et l'automobile. Le tableau ci-dessous donne la composition de quelques alliages ayant précisément ce dernier emploi :

ALUMINIUM	CUIVRE	IMPURETÉS	
		SILICIUM	FER
94,9 %	4,7 %	0,41 %	0,10 %
95,7	4,1	0,32	0,07
96,2	3,5	0,32	0,09
96,8	3,9	0,24	0,07
97,0	2,7	0,19	0,20
96,9	2,8	0,20	0,12
96,5	3,1	0,31	0,05

Constructions maritimes.—Il semble qu'aujourd'hui la principale application du bronze à 10 % d'aluminium soit pour les *constructions à la mer*, d'après ce qui a été dit plus haut au sujet de sa grande résistance chimique et de ses qualités mécaniques. Mais il convient également à la fabrication d'un grand nombre de pièces de machines

exigeant une grande précision et pour la conservation desquelles la rouille, dans le cas particulier de l'acier, est un obstacle sérieux.

Pièces mécaniques. — Les alliages riches en aluminium servent surtout, dans l'*automobile*, pour la fabrication des pièces formant enveloppe : carters de changement de vitesse, carters de volants de moteur, etc.

L'alliage à 10 °/₀ d'aluminium sert pour les pièces de machines (valves, boulons) nécessitant une certaine résistance à l'usure. On l'utilise aussi pour la fabrication des *ressorts*, notamment des ressorts plats prélevés dans des planches écrouies et pour la préparation des *coussinets* d'excentriques. Cependant, pour ce dernier emploi, c'est l'alliage à 7,6 °/₀ de cuivre qui paraît donner les meilleurs résultats. Tant au point de vue du prix de revient que des qualités mécaniques, il est bien supérieur à l'antifriction le plus généralement adopté (étain-cuivre-antimoine), ainsi qu'on peut en juger par les chiffres du tableau ci-dessous :

NATURE ET COMPOSITION DE L'ALLIAGE		POINT DE FUSION	EMPREINTE SOUS CHARGE de 2.000 tonnes	PERTE DE POIDS PAR CENT. CARRÉ après 1 h. de frottem^t
Antifriction	83,83 Sn 11,11 Sb 5,5 Cu	225°	1^mm,68	0^gr,01
Bronze d'aluminium	91,77 Al 7,61 Cu	628°	0^mm,81	0^gr,003

A égalité de poids, le bronze d'aluminium indiqué coûte 2 fr. 50 alors que l'antifriction coûte 5 francs. En tenant compte des densités (rapport : 1 à 3), on a une dépense de 2 fr. 50 pour le bronze contre 15 francs pour l'antifriction.

Pour l'obtention d'un alliage doux et malléable, tel que celui servant à la fabrication des *feuilles*, le pourcentage d'aluminium est réduit à 8 ; on a un bronze pouvant se laminer facilement et, d'autre part, suffisamment tenace.

Ce même alliage à 8 °/₀ Al s'emploie également pour la fabrication des *tubes sans soudure*.

Le meilleur bronze pour *chevilles*, celles notamment destinées à enrayer les affûts de canons, comprend 9 parties d'aluminium et 81 de cuivre; sa résistance à la rupture serait, d'après Sperry, de 40 kilogrammes par millimètre carré et l'allongement de 20 %; son grand avantage sur l'acier est qu'il ne prend pas la rouille.

Monnaie. — On a proposé à différentes reprises une *monnaie de billon* en bronze d'aluminium concurremment à celle d'aluminium pur qui a également été préconisée par plusieurs techniciens. Le bronze permettrait d'éviter toute confusion par sa couleur, mais comme il est beaucoup plus lourd et aussi plus cher que l'aluminium, il ne paraît pas devoir avoir gain de cause dans cet emploi.

Usages domestiques. — Ceux du bronze d'aluminium riche ne tendent qu'à s'accroître. On en fait des appareils de filtration, des récipients à eau de Seltz, des vases pour contenir l'eau et le vin, des batteries de cuisine. Pour ce dernier emploi, il présente sur le cuivre l'avantage de ne pas former de vert-de-gris, et sur le nickel celui de ne jamais contenir la moindre trace d'arsenic. Il peut facilement présenter à l'intérieur des récipients le ton mat de l'argent et à l'extérieur le poli du nickel. Il est du reste très facile à entretenir avec des pâtes à mordant très doux pour la partie brillante et avec le savon minéral pour la partie mate; un mélange de tripoli et de carbonate de soude à faible dose peut au besoin remplacer le savon minéral (1). On doit seulement éviter l'emploi d'eau contenant de la soude ou de la potasse en solutions concentrées et surtout l'acide chlorhydrique qui agit rapidement sur lui. Cet alliage présente au point de vue de ses usages culinaires l'avantage d'avoir presque la même conductibilité calorifique que l'argent avec un très faible pouvoir émissif; enfin il se signale par sa légèreté, ne pesant, à volume égal, que le tiers environ du fer, du nickel ou du cuivre.

Soudure du bronze d'aluminium. — Pour la *soudure* du bronze à 10 % d'aluminium, on a recommandé le mélange suivant, employé sous forme d'alliage :

(1) D'après H. Le Chatelier, on peut voir aujourd'hui dans les familles des anciens amis de H. Sainte-Claire Deville des ustensiles en bronze d'aluminium en service depuis cinquante ans et aussi brillants que les premiers jours.

Étain	86 %
Zinc exempt de fer	5
Mercure	5

Comme décapant on se sert de chlorure de zinc.

On peut également employer l'alliage suivant :

Plomb	70 à 80 %
Cadmium	30 à 20

Comme décapant on se sert à l'eau à souder ordinaire.

Si l'on veut obtenir une soudure autogène, ce qui est évidemment préférable pour la solidité et la durée du joint, on fera mieux d'utiliser le chalumeau oxyacétylénique. Comme métal d'apport, on emploiera une baguette de métal ayant la composition de l'alliage à souder. La seule précaution à prendre, s'il s'agit de soudure de pièces assez fortes, c'est de les porter préalablement au rouge et d'exécuter la soudure le plus rapidement possible. Comme poudre décapante, on peut utiliser celle indiquée par l'Union de la soudure autogène et composée d'un mélange de chlorure de sodium, de borax et d'acide borique. Cette poudre assure un décapage parfait de l'alliage, dissout l'alumine et protège la surface en fusion de l'oxydation ainsi que des gaz de la combustion, ce qui évite les soufflures.

CHAPITRE V

BRONZES, LAITONS ET MAILLECHORTS A L'ALUMINIUM

I. — Bronzes à l'aluminium.

Bronzes ordinaires à l'aluminium. — Les bronzes à l'aluminium sont des alliages de cuivre et d'étain, c'est-à-dire des bronzes ordinaires, auxquels on a ajouté des quantités plus ou moins importantes d'aluminium. Il ne faut pas les confondre avec les bronzes d'aluminium ou alliages de cuivre et d'aluminium dont il a été question précédemment (V. Chap. iv)

Dans les bronzes où l'aluminium n'entre qu'à l'état de traces, ce métal sert simplement d'*épurateur* en réduisant les oxydes formés au cours de la fusion ou occlus dans les métaux.

Dans les bronzes contenant une certaine quantité d'aluminium, soit de 2 à 10 %, ce métal n'augmente en rien les qualités mécaniques des alliages cuivre-étain. On peut s'en rendre compte par les chiffres ci-après, qui se rapportent à un bronze à 90 % de cuivre et 10 % d'étain, dans lequel on a substitué à l'étain des quantités croissantes d'aluminium :

COMPOSITION			PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES		
Cu %	Sn %	Al %	RÉSISTANCE A LA RUPTURE	LIMITE ÉLASTIQUE	ALLONGEMENT
90,93	9,00	0,07	23kg,5	11kg,8	26,2 %
89,66	9,87	0,47	15 ,8	9 ,2	2
89,54	9,70	0,76	12 ,9	7 ,7	2
89,05	8,74	2,21	12 ,9	7 ,7	2
90,71	5,18	4,11	10 ,0	6 ,5	5
89,10	3,59	7,31	17 ,1	12 ,5	3

Les résultats de ces essais, dus à L. Guillet, montrent que lorsque la teneur en aluminium atteint 0,4 %, la résistance à la rupture et la limite élastique descendent brusquement. La fragilité augmente aussi très rapidement. La dureté est peu modifiée par la présence de l'aluminium. Des traces de ce métal ne modifient pas sensiblement les propriétés mécaniques des bronzes ordinaires. La façon dont l'aluminium se comporte dans ces alliages au point de vue micrographique fait que ces derniers semblent avoir une teneur en cuivre plus faible que celle qu'ils ont en réalité

Voici la composition d'un bronze à aluminium fabriqué par les usines Krupp, à Essen :

Cuivre	8 %
Étain	5
Aluminium	87

La teneur en cuivre peut varier entre 7 et 8,5 et celle de l'étain entre 4,5 et 5,5. Cet alliage, destiné à concurrencer les alliages aluminium-zinc, possède, en outre de sa légèreté, une grande facilité de fusion, ce qui permet de l'utiliser pour la fabrication de pièces fondues homogènes. Il possède un très bel aspect.

Alliages Cothias. — Ils sont formés d'aluminium, de cuivre et d'étain, métaux auxquels on ajoute parfois un peu de manganèse, de titane ou de phosphore. Les plus simples de ces alliages présentent l'une des compositions suivantes :

	N° 1	N° 2
Cuivre	180 parties	40 parties
Étain	150 —	80 —
Aluminium	10 —	880 —

Ils sont très appréciés dans l'industrie depuis quelques années. Ils contiennent parfois de 30 à 50 % de zinc (V. LAITONS, p. 159). L'alliage N° 1 est employé pour la fabrication des coussinets.

Bronzes à l'aluminium et au fer. — On a cherché à utiliser plusieurs alliages renfermant de l'aluminium, du cuivre et du fer, concurremment au laiton, et notamment ceux correspondant aux compositions suivantes :

	N° 1	N° 2
Aluminium	89,3 %	88,1 %
Cuivre	8,9	8,6
Fer	1,3	2,8

Après laminage à chaud ou étirage à froid, ces deux alliages semblent présenter des propriétés intéressantes, mais au bout d'un certain temps, ils se fendent et deviennent ainsi impropres à tout usage. Ils présentent donc, après écrouissage, les mêmes dangers que le laiton.

On a également essayé, en vue de la construction des bâtiments marins, l'alliage suivant :

Aluminium	7 %
Cuivre	88
Fer	3
Silicium	1,5
Zinc	0,5

Ce bronze à l'aluminium et au fer, après vingt-cinq mois d'immersion dans de l'eau de mer, n'avait que peu perdu de sa résistance initiale, bien que la diminution de poids fût assez sensible. Il se rapprocherait, par cette propriété, du bronze ordinaire.

Bronzes à l'aluminium et au manganèse. — Les alliages cuivre-aluminium-manganèse sont surtout utilisés dans l'industrie mécanique et automobile. On les prépare généralement en partant d'aluminium et de cupro-manganèse. Ils sont très mauvais conducteurs de l'électricité.

Susini a imaginé différents bronzes à l'aluminium et au manganèse dans lesquels les trois éléments de l'alliage varient dans d'assez grandes proportions. Ils renferment souvent aussi une faible quantité de zinc. Voici la composition de deux de ces alliages :

	N° 1	N° 2
Aluminium	90 %	94 %
Cuivre	1	4
Manganèse	8,5	1
Zinc	0,5	1

Les alliages cuivre-aluminium-manganèse se signalent par une propriété singulière : ils sont *magnétiques* dans certaines conditions de température et d'équilibre, alors qu'aucun de leurs éléments n'est magnétique dans les mêmes conditions.

Actuellement, on ne connaît que trois métaux magnétiques à la température ordinaire : le fer, le nickel et le cobalt. Portés à une certaine température, qui varie avec chaque métal, ils deviennent non magnétiques ou très faiblement magnétiques.

D'autre part, il existe des alliages qui sont magnétiques quoique renfermant un métal non magnétique : c'est le cas des ferro-aluminiums ne renfermant pas plus de 20 % d'aluminium ; ils perdent leur magnétisme au-dessus de cette teneur en aluminium. Enfin, on connaît des alliages qui ne sont pas magnétiques quoique formés de deux métaux magnétiques : c'est le cas de certains aciers au nickel.

Mais les alliages cuivre-aluminium-manganèse constituent le seul exemple d'un composé magnétique ne renfermant aucun métal magnétique.

La première observation relative à cette curieuse propriété est due à Hoog qui, en 1892, présenta à l'Association britannique un mémoire sur les ferro-manganèses. Un de ces alliages, à 82 % de manganèse, qui était non magnétique, le devint par l'addition de 3 % d'aluminium. Heussler remarqua plus tard qu'un fragment d'alliage aluminium-cuivre-manganèse était attiré par un outil aimanté et même qu'il pouvait attirer les corps magnétiques.

Dans le but d'élucider cette question, Fleming et Hadfield, en 1905, firent préparer des anneaux homogènes destinés à des expériences magnétiques et composés de cuivre, aluminium et manganèse. Un de ces alliages a donné à l'analyse la composition suivante :

Aluminium	11,65 %
Cuivre	60,49
Manganèse	22,42
Carbone	1,50
Fer et silicium	0,58
Bioxyde de manganèse et silice	2,50

Chaque anneau fut recouvert d'un enroulement primaire et d'un

enroulement secondaire, de manière à pouvoir produire une force magnétisante connue. On notait, dans le secondaire, l'induction qui en résultait. Les chiffres obtenus montrent que ces alliages se comportent d'une façon analogue aux substances ferro-magnétiques, tant pour les courbes d'aimantation que pour l'hystérésis. Les courbes d'hystérésis (*fig.* 48) sont en effet comparables à celles du fer. La perméabilité est un peu inférieure à celle du cobalt. Ils présentent le phénomène de l'aimantation rémanente et de force coercitive.

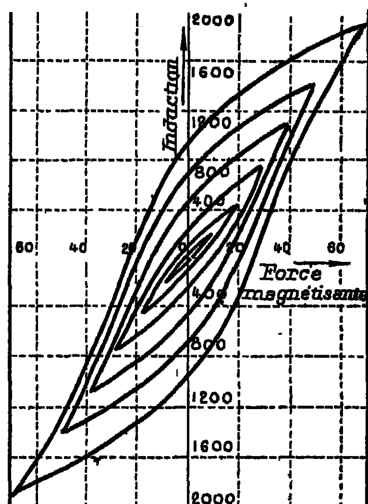


Fig. 48. — Cycles d'hystérésis magnétique des alliages aluminium-cuivre-manganèse.

Pour expliquer cette cause de magnétisme, on a formulé de nombreuses hypothèses.

On sait du reste que déjà Faraday avait émis l'idée qu'en refroidissant suffisamment certains métaux du groupe du fer, le chrome et le manganèse notamment, on verrait apparaître chez ces métaux la vertu magnétique. Seckelson a montré assez récemment que le manganèse électrolytique possédait des propriétés magnétiques mesurables, bien que celles-ci soient difficiles à évaluer.

D'après Fleming et Hadfield, le magnétisme étant la propriété, non pas de l'atome chimique, mais d'un groupement moléculaire particulier, on doit l'envisager comme assez général et prêt à se manifester souvent d'une façon inattendue.

D'après E. Guillaume, l'aluminium jouerait un rôle important dans la manifestation de ce phénomène au sein des alliages aluminium-cuivre-manganèse. Lorsqu'on additionne le fer, métal magnétique, d'une certaine quantité d'aluminium, on voit ses propriétés magnétiques augmenter. Or l'aluminium a en même temps pour effet de faire accroître en dimensions les cristaux de fer α, fer magnétique par excellence. L'aluminium, bien que ne créant pas

des propriétés magnétiques absentes, fait néanmoins apparaître celles-ci en des points où elles n'existaient pour ainsi dire qu'à l'état latent.

On a aussi invoqué la théorie des constituants. Les alliages cuivre-manganèse et cuivre-aluminium sont à peine magnétiques. L'alliage à 70 % de cuivre et 30 % de manganèse possède après trempe une aimantation résiduelle plus grande que celle qu'il possède à l'état brut. D'autre part, l'alliage cuivre-aluminium à 10 % d'aluminium a des propriétés très voisines des alliages cuivre-aluminium-manganèse en ce qui concerne les effets de la trempe et du refroidissement. Il contient le constituant $AlCu^3$, et comme les alliages cuivre-aluminium contenant ce composé (alliages à 12,5 % environ d'aluminium) sont les plus magnétiques de la série cuivre-aluminium, on a supposé que ce constituant jouait un rôle important dans cette propriété. Heussler et Richarz ont remarqué, en outre, que les alliages magnétiques ternaires aluminium-cuivre-manganèse contiennent des composés ternaires dans lesquels un atome d'aluminium est associé à trois atomes des deux autres métaux. Gartner préfère attribuer les propriétés magnétiques de ces alliages à des solutions solides dans lesquelles entrerait le constituant $AlCu^3$ avec $AlMn^3$ ou du manganèse libre ; il y aurait là un fait analogue à l'action de l'aluminium en petites quantités sur le fer ou à celle du nickel et d'autres éléments sur la position du point de transformation magnétique du fer.

Duralumin. — Le *duralumin* ou *duraluminium* est un bronze d'aluminium contenant de 93 à 95 % de ce métal, de 3 à 5 % de cuivre, de 0,5 à 1,5 % de magnésium et quelques impuretés. Voici la composition exacte d'un échantillon de duralumin :

Aluminium	95,00 %
Cuivre	3,30
Magnésium	1,00
Fer	0,29
Silicium	0,22
Manganèse	0,19

Cet alliage, qui a déjà de nombreux emplois, est remarquable par l'ensemble de ses propriétés, tant chimiques que mécaniques, qui

lui donnent sur plusieurs points de sérieux avantages sur l'aluminium pur.

Au point de vue chimique, le duralumin résiste à l'humidité, à l'eau ordinaire, à l'eau de mer, aux acides sulfurique et nitrique et aux vapeurs de ces corps, à l'action du mercure. Il est seulement attaqué par les solutions alcalines et l'acide chlorhydrique. Il n'est pas magnétique, possède un ton argenté et est susceptible de prendre un beau poli.

Au point de vue mécanique, le duralumin supporte facilement le laminage, le forgeage, l'étirage à chaud et à froid. Suivant l'usage auquel on le destine, on modifie sa composition et son traitement de manière à faire varier ses caractéristiques mécaniques. Les chiffres ci-dessous se rapportent à des tôles de $6^{mm},5$ d'épaisseur réduites à 2 millimètres par des passes successives de $0^{mm},75$:

ÉPAISSEUR DE LA TOLE en millimètres	RESISTANCE A LA RUPTURE	LIMITE ÉLASTIQUE	ALLONGEMENT
6,5	45^{kg}	$25^{kg},5$	18 %
5,6	50	42	7
4,6	54	45	6,5
3,8	56	48	5
3,2	59	51	4,5

Ces propriétés sont extrêmement remarquables en ce qui concerne la résistance à la rupture et la limite élastique. Toutefois, à partir de 150° C., la résistance à la rupture baisse rapidement, de sorte que le duralumin ne doit pas être employé au-dessus de cette température.

La densité de cet alliage varie entre 2,75 et 2,84 suivant sa composition. Il fond vers 650°. Sa dureté dépasse de beaucoup celle de l'aluminium et du bronze. Sa conductibilité électrique est plus faible que celle de l'aluminium pur. Il est utilisé sous forme de tôles et de profilés, de tubes, de barres, de fils, de ressorts à boudin, de pièces forgées ou estampées de section quelconque. Mais, de même que la plupart des alliages à ténacité élevée, il ne peut être employé pour les moulages. Comme il est très sonore, il peut servir

à la confection des cloches et des instruments de musique. Dans les appareils orthopédiques il a donné de bons résultats. On l'utilise également pour la fabrication des récipients à bière, des chapeaux de fusées. Ses qualités de légèreté et de résistance mécanique, supérieure à celle de l'aluminium, l'ont fait employer dans la construction du premier dirigeable de la marine anglaise pour lequel il a donné toutes satisfactions.

Le duralumin ne doit pas, lorsque cela est possible, être mis en contact continu avec le cuivre et le bronze, car il forme avec ces corps des couples qui pourraient le corroder à la longue sous l'influence des agents atmosphériques ou de certains produits salins ou acides. Pour la même raison, il doit être révélé avec des rivets de fer ou, de préférence, de sa propre substance. Mais, lorsqu'on doit le souder, le mieux est d'utiliser comme métal d'apport un fil d'aluminium. En effet, ce métal et le duralumin ont à peu près la même température de fusion, et la liaison entre le métal rapporté et les bords à souder est parfaitement réalisable. Cependant, l'assemblage ainsi réalisé est toujours un peu fragile dans la zone de contact, et la rupture, lorsqu'elle se produit, se fait toujours à côté du métal rapporté.

La soudure autogène du duralumin peut se faire avec un fil de même composition. On obtient sans difficulté une soudure ayant une grande ténacité, mais sa résistance au choc est extrêmement faible. De plus, si on soumet la partie soudée à un essai de pliage statique, la déformation qu'on peut obtenir avant rupture est très faible : l'alliage ne possède aucune ductilité dans la partie fondue et présente des criques pour un angle de pliage insignifiant. Cela est en rapport avec la structure même de l'alliage après fusion : le manganèse est seul susceptible de former avec l'aluminium une solution solide, tandis que le cuivre et le magnésium, en donnant naissance à un réseau intercristallin d'eutectique, forment des granulations isolées qui se répartissent uniformément dans la masse.

Bronzes à l'aluminium et au magnésium. — Sous le nom de *duralum*, on désigne un alliage différent du précédent et ne contenant pas de manganèse. Il répond à la composition suivante :

Aluminium	79 %
Magnésium	11
Cuivre à 0,5 % de phosphore	10

Cet alliage est encore peu employé bien qu'on ait tenté son utilisation pour la fabrication des aéroplanes. C'est qu'en effet une teneur de 10 % de cuivre semble élevée, surtout en présence de 11 % d'un métal durcissant comme le magnésium et qui doit évidemment donner lieu à un alliage par trop cassant.

Bronzes à l'aluminium et au tungstène. — Susini et Langlois ont préparé des alliages aluminium-cuivre-tungstène dans lesquels le pourcentage des trois éléments varie suivant le but de l'alliage. Les principaux types ont l'une des compositions centésimales ci-dessous :

Al %	Cu %	Tu %
3	95	1,5
5	90	4,5
7	88	4,5
8	86	5,5
9	85	5,5
10	83	6,5

Ces alliages contiennent tous, en outre, 0,5 % environ de phosphore. Pour les préparer on peut allier les trois métaux en commençant par fondre le tungstène et le cuivre, puis ajouter l'aluminium en dernier lieu. On peut aussi, suivant les inventeurs, préparer le cupro-tungstène en réduisant le wolfram par le charbon en présence de cuivre pur dans un four électrique. On obtient ainsi un alliage binaire contenant 50 % de chacun de ses deux éléments. On place ensuite dans un creuset la quantité de cuivre nécessaire pour obtenir dans le produit final le pourcentage désiré de ce métal et on le fait fondre après y avoir introduit la proportion voulue de cupro-tungstène préparé antérieurement. Lorsque le bain liquide a atteint la température du rouge blanc, on ajoute l'aluminium. On purifie finalement l'alliage en l'additionnant, après brassage, de 0,5 à 0,75 % de phosphore.

Ces bronzes à l'aluminium et au tungstène sont surtout destinés à

la fabrication des pièces mécaniques nécessitant une dureté et une résistance mécanique supérieures à celles des bronzes ordinaires.

Bronzes à l'aluminium et au vanadium. — L'addition de petites quantités de vanadium aux alliages cuivre-aluminium se traduit par une augmentation importante de leur charge de rupture. C'est ainsi qu'un bronze d'aluminium contenant 94,5 % de cuivre et 5,5 % d'aluminium a une charge de rupture qui passe brusquement de 32 à 68 kilogrammes lorsqu'on l'additionne de 0,5 % seulement de vanadium. Ce métal possède du reste la propriété, dans presque tous les alliages où on l'incorpore, d'augmenter les qualités mécaniques de ces derniers. Nous en avons déjà dit quelques mots à propos des alliages aluminium-vanadium (v. p. 232).

Bronzes à l'aluminium et au silicium. — Les bronzes d'aluminium siliciés, ou alliages ternaires cuivre-aluminium-silicium, ont encore peu d'emplois. Ils sont concurrencés par les cupro-siliciums, les bronzes d'aluminium et les bronzes siliceux, qui possèdent d'importantes qualités. Susini et Langlois ont cependant breveté l'alliage suivant :

Aluminium	9 %
Cuivre	90
Silicium	1

On l'obtient en chauffant d'abord pendant deux heures, dans un creuset de plombagine et à la température de fusion de l'acier, un mélange comprenant 20 parties d'aluminium et 80 parties de fluosilicate de potasse. D'autre part, on fait fondre du cuivre et on ajoute en quantité convenable l'alliage obtenu dans la première opération.

Bronzes à l'aluminium et à l'or. — Sous le nom d'*or de Nuremberg* on désigne un alliage présentant la composition suivante :

Aluminium	7,5 %
Cuivre	90
Or	2,5

Il possède une belle couleur or, encore plus accentuée que celle

du bronze d'aluminium proprement dit, c'est-à-dire un peu plus pourprée. On l'utilise en bijouterie.

Bronzes à l'aluminium et au bore. — Ces bronzes sont, paraît-il, encore plus inaltérables à l'air que les bronzes d'aluminium ordinaires. On les obtient de la manière suivante :

L'aluminium est d'abord fondu dans un creuset sous une couche composée d'un mélange de fluorine (3 parties) et d'acide borique (1 partie). On chauffe à une température suffisante : il se forme du fluorure de bore qui réagit sur l'aluminium. Le bore isolé se mélange avec ce métal et forme l'alliage désiré. Celui-ci est employé dans la proportion de 10 parties pour 90 de cuivre. La fusion de ce second mélange pour la production du bronze est effectuée sous une couche de charbon de bois et d'oxyde de manganèse.

Bronzes à l'aluminium et au phosphore. — Pour la soudure autogène des cuivres, laitons et bronzes, Granjon et Rosemberg ont préconisé un alliage cuivre-phosphore-aluminium dans lequel ce dernier métal n'entre qu'en très faible quantité. Le phosphore lui-même est en petite proportion dans l'alliage, car il ne doit pas subsister dans la soudure après son exécution. L'aluminium est destiné à la désoxydation des soudures ; pour cette raison, l'alliage doit être très homogène. Le phosphore agit aussi comme désoxydant.

Ces alliages sont généralement obtenus et utilisés sous forme de baguettes coulées, ce qui rend leur préparation assez délicate.

Secrétan a fait breveter une série d'alliages qui renferment également du phosphore à l'état de traces. Il est ajouté au bronze d'aluminium à l'état de phosphure de cuivre ou d'aluminium. Ces alliages, qui semblent avoir été étudiés très sérieusement au point de vue de leur mode de préparation et de leur composition, contiennent également un peu de nickel (0,01 °/₀ environ).

Bronzes complexes. — Outre les alliages qui précèdent, on a préconisé à différentes époques des alliages variés de cuivre et d'aluminium contenant un plus ou moins grand nombres d'éléments additionnels, tels que le bore, le zinc, le silicium.

Alliages cuivre-aluminium-fer-silicium. — Il y a près d'un demi-siècle qu'on connaît différents bronzes d'aluminium renfermant du fer et du silicium. Ces deux éléments paraissent, d'après les résultats obtenus, jouer le même rôle que l'aluminium en augmentant la résistance à la rupture et en diminuant les allongements. Les alliages qui donnent les meilleurs résultats dans l'industrie sont ceux pour lesquels la somme aluminium-silicium est égale à 8 ou 10 %. Avec plus de 10 % de ces éléments réunis, on a des alliages trop fragiles; avec moins de 8 %, on a une résistance trop faible.

Bronzes au nickel. — Le bronze d'aluminium renfermant un peu de nickel possède également d'intéressantes propriétés; le rôle du nickel semble être d'augmenter la résistance à la rupture et les allongements.

Wolframinium. — Cet alliage (1), imaginé par Reinhard et Roman, répond à la composition suivante :

Aluminium	98 %
Tungstène	0,04
Cuivre	0,37
Étain	0,10
Antimoine	1,44

Ecroui, cet alliage présente une résistance à la rupture de 38^{kg},7 et un allongement de 2,14 %. Recuit, il présente une résistance à la rupture de 26^{kg},5 et un allongement de 15,24 %.

Bronze Hélouis. — Il renferme de l'aluminium, du vanadium et du cobalt et possède une résistance à la rupture de 42 à 45 kilogrammes. On l'emploie concurremment au bronze ordinaire et au laiton au vanadium. C'est un alliage quaternaire cuivre-aluminium-vanadium-cobalt.

(1) Etymologie : wolfram (minerai principal de tungstène) et aluminium.

II. — Laitons à l'aluminium.

Constitution. — Les laitons à l'aluminium sont des alliages ternaires cuivre-zinc-aluminium résultant de la substitution de l'aluminium à quelques centièmes de zinc. Ils présentent un grand intérêt pratique, car ils jouissent d'un ensemble de propriétés qui leur réservent des emplois importants dans l'industrie.

D'après L. Guillet, qui a entrepris des recherches complètes sur ces alliages, on peut ramener à deux types principaux les laitons ordinaires : ceux à 70 °/₀ de cuivre et 30 °/₀ de zinc, et ceux à 60 °/₀ de cuivre et 40 °/₀ de zinc. En substituant au zinc de chacun d'eux des quantités d'aluminium comprises entre 1 et 10 °/₀, on constate les faits suivants avec les laitons à 60 °/₀ de cuivre :

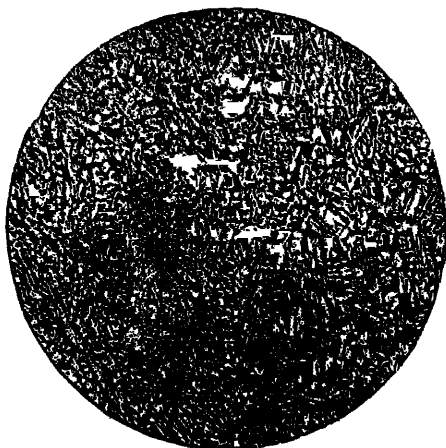


Fig. 49. — Laiton à l'aluminium (Cu = 60 ; Zn = 39,5 ; Al = 0,5). Attaque à la solution ammoniacale d'oxyde de cuivre. — Gross. : 50 diam. (D'après L. Guillet.)

Jusqu'à 0,5 °/₀ d'aluminium (*fig.* 49), il ne se produit aucune transformation dans la microstructure de l'alliage. A partir de 1 °/₀, les cristaux de ZnCu se détachent beaucoup mieux. A 2 °/₀, on ne trouve que des polyèdres comme dans les laitons ordinaires renfermant 55 °/₀ de cuivre. A 5 et 7 °/₀, on trouve encore des polyèdres, entourés de plages noires dans le second alliage (*fig.* 50).

Les laitons à 70 °/₀ de cuivre contenant moins de 2 °/₀ d'aluminium ont la microstructure des laitons ordinaires, Le constituant β apparaît dès que la teneur 2 °/₀ est dépassée. A 6 °/₀ d'aluminium on ne voit plus que des polyèdres. A 10 °/₀, on voit

se développer dans ces polyèdres de très nombreux petits cristaux.

Mais ce qu'il est intéressant de faire remarquer, c'est que, comme conséquence de ce qui précède, le laiton ayant la composition suivante :

Cuivre	60 %
Zinc	2
Aluminium	38

possède la même structure que le laiton ordinaire à 55 % de cuivre et 45 % de zinc. Ainsi, 2 % d'aluminium jouent le même rôle que 7 % de zinc ou, ce qui revient au même, 1 % d'aluminium équivaut à 3,5 % de zinc. La même remarque s'applique aux laitons renfermant 70 % de cuivre et 30 % de zinc et dans lesquels on remplace une partie du zinc par de l'aluminium : on aboutit toujours à la même conclusion. Il en est de même, comme nous le verrons plus loin, au point de vue des propriétés mécaniques.

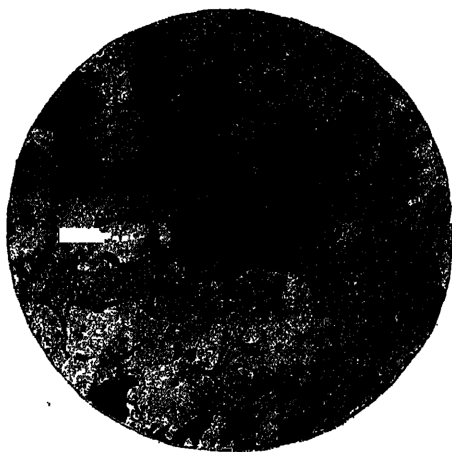


Fig. 50. — Laiton à l'aluminium (Cu = 60 ; Zn = 33 ; Al = 7). Attaque à la solution ammoniacale d'oxyde de cuivre. — Gross. : 50 diam. (D'après L. Guillet.)

Propriétés. — *Couleur.* — Des traces d'aluminium, soit 0,5 à 1 % de ce métal, donnent au laiton à 60 % de cuivre et 40 % de zinc une coloration or très belle. Cette coloration se maintient jusque vers 5 % d'aluminium, teneur pour laquelle l'alliage devient légèrement rosé. A 7 %, il prend une superbe teinte rose. Il est alors dichroïque, car, vu sous une certaine incidence, il paraît blanc d'argent. A 10 % d'aluminium, il possède nettement cette dernière teinte. Les alliages à 70 % de cuivre et 30 % de zinc ont la même coloration pour des pourcentages égaux d'aluminium.

Propriétés mécaniques. — Elles varient avec la teneur en aluminium. Nous donnons ci-dessous, d'après Guillet, les résultats obtenus sur des laitons à 60 % de cuivre, les essais ayant porté sur des *barres brutes de coulée* :

CUIVRE	ZINC	ALUMINIUM	RÉSISTANCE A LA RUPTURE	LIMITE ÉLASTIQUE	ALLONGEMENT
60 %	40 %	0 %	31kg,9	8kg,1	47 %
59,6	40,1	0,3	32 ,3	9 ,9	51,5
59,9	40,3	0,8	30 ,9	9 ,5	45
59,6	38,5	2,9	46 ,0	11 ,8	14
60,4	35,9	4,7	44 ,1	17 ,8	2

Avec des *barres laminées étirées et recuites*, on a obtenu les chiffres ci-dessous :

CUIVRE	ZINC	ALUMINIUM	RÉSISTANCE A LA RUPTURE	LIMITE ÉLASTIQUE	ALLONGEMENT
61,4 %	38,4 %	0,7 %	35kg,2	10kg,1	45 %
60,3	38,2	1,1	38 ,1	11 ,3	36
60,0	37,7	1,4	36 ,7	12 ,3	43,5
59,8	37,9	2,0	39 ,1	18 ,1	17
59,8	37,2	2,7	44 ,5	17 ,7	16
60,0	36,4	3,9	48 ,1	18 ,3	13

Ces essais montrent que, d'une façon générale, l'aluminium substitué au zinc dans les laitons ordinaires augmente la résistance à la rupture et la limite élastique; il commence par augmenter, puis diminue un peu les allongements. Il augmente très nettement la résistance lorsqu'il est en petite quantité dans l'alliage. Il n'augmente la dureté qu'à partir d'un pourcentage assez élevé; on a alors des laitons très durs, comme c'est le cas de l'alliage suivant :

Cuivre	70 %
Zinc	20
Aluminium	10

Cet alliage possède une dureté telle qu'il est impossible de le

polir ni de le travailler d'aucune façon. Il est du reste extrêmement fragile.

Jusqu'à 4 % d'aluminium, ces alliages se travaillent, par contre, très bien à chaud. Au delà de 4 %, ils deviennent difficiles à travailler : le laminage peut encore se faire à chaud, mais l'alliage se brise à l'étirage. A partir de 6 %, on ne peut plus les laminer.

Fabrication. — M. Guillet a préparé des laitons à l'aluminium en ajoutant à l'alliage cuivre-zinc l'aluminium sous forme de métal : la plus grande partie était introduite dans le creuset placé au four et le complément au moment même de la coulée, le creuset étant retiré du four.

Industriellement, ces alliages se préparent généralement par union directe des trois éléments. L'aluminium étant fort difficile à allier par suite de sa faible densité, il faut mélanger la masse avec grands soins pendant la fusion. Souvent, au lieu d'aluminium pur, on emploie du cupro-aluminium obtenu dans une opération préalable. Les déchets de tubes, planches, etc., sont parfois utilisés lorsqu'ils ne contiennent pas d'impuretés et que, bien entendu, ils répondent à la composition de l'alliage à obtenir.

Emplois. — La plupart des laitons à l'aluminium utilisés dans l'industrie se rapportent aux trois principaux types suivants :

	N° 1	N° 2	N° 3
Cuivre	68 à 70 %	64 à 66 %	58 à 61 %
Zinc	31 à 27	33 à 30	40,5 à 37,5
Aluminium	1 à 3	1 à 4	0,3 à 1,5

Laiton de Froges. — Il se rapporte au type N° 1 et présente la composition suivante :

Cuivre	69,10 %
Zinc	24,61
Aluminium	4,23
Fer	1,73
Plomb	0,32

Bronze Roma. — Il se rapporte au type N° 3 et présente la composition suivante :

Cuivre	58,58 %
Zinc	40,67
Aluminium	0,20
Fer	0,03
Plomb	0,39

Métal Delta. — Il renfermerait, d'après Hadfield, 44,06 % de zinc, 55,01 % de cuivre et 0,47 % d'aluminium. On désigne cependant sous ce nom plusieurs alliages de compositions très dissemblables. C'est ainsi que certains renferment jusqu'à 2 % de fer, d'autres n'en renferment que 0,7 % et pas d'aluminium.

Macadamite. — Sous ce nom on désigne un alliage d'origine américaine répondant à la composition suivante :

Cuivre	4 %
Zinc	24
Aluminium	72

Il se polit fort bien, possède une grande résistance mécanique et chimique. Il a été lancé pour remplacer le laiton ordinaire dans un grand nombre de ses applications. Sa résistance à la rupture est de 31 kilogrammes.

La marine a utilisé des laitons se rattachant au type N° 2 pour la construction des torpilles et des sous-marins. Pour beaucoup d'autres applications, les laitons à l'aluminium peuvent remplacer les laitons au manganèse et réciproquement.

Alliage pour soudure. — Pour la soudure autogène des alliages aluminium-zinc, Granjon et Rosemberg recommandent l'alliage suivant qui leur a toujours donné d'excellents résultats :

Cuivre	2 %
Zinc	10
Aluminium	88

Cet alliage, rendu bien homogène, est coulé en baguettes de grosseur appropriée aux réparations à exécuter.

Alliages pour carters d'automobiles. — Les laitons à l'aluminium sont aussi employés pour la fabrication des carters d'automobile. Un de ces alliages a donné, à l'analyse, la composition suivante :

Aluminium	84 %
Zinc	14,5
Cuivre	1,5
Silicium	Traces

Ce n'est pas à proprement parler un laiton à l'aluminium d'après la définition qui en a été donnée plus haut, mais un alliage de zinc et d'aluminium contenant un peu de cuivre.

Alliages Cothias. — Certains alliages Cothias sont des laitons complexes à l'aluminium, témoins les deux suivants :

	N° 1	N° 2
Cuivre	8 %	4 %
Zinc	50	36
Étain	19	20
Aluminium	23	40

L'alliage N° 1 est employé dans la fabrication des pièces légères. L'alliage N° 2 est beaucoup plus lourd, sa densité étant à peine inférieure à 5.

III. — Maillechorts à l'aluminium.

Constitution et propriétés mécaniques. — Les maillechorts se différencient des alliages précédemment étudiés par la présence d'une certaine quantité de nickel. Les maillechorts ordinaires sont des alliages ternaires cuivre-zinc-nickel, mais ils ne renferment parfois que du cuivre et du nickel. Les maillechorts à l'aluminium contiennent ce métal en proportion très minime : c'est le cas de certains cupro-nickels épurés à l'aluminium qui renferment seulement des traces de ce métal. Tels sont ceux présentant la composition suivante :

Cuivre	60 à 90 %
Nickel	40 à 10
Aluminium	0,05 à 0,17

En général on a affaire à des maillechorts plus ou moins complexes, c'est-à-dire renfermant, outre les métaux qui précèdent, des éléments tels que le magnésium, le fer, le silicium, qui modifient les propriétés de l'alliage suivant sa destination.

Certains maillechorts à l'aluminium présentent des *propriétés mécaniques remarquables*, même avec une quantité relativement faible d'aluminium. C'est le cas, notamment, des alliages renfermant de 3 à 7 % environ de ce métal. Nous donnons ci-dessous la composition de quelques-uns de ces maillechorts :

	N° 1	N° 2	N° 3
Cuivre	59,53 %	82,71 %	89,53 %
Nickel	32,82	13,95	3,07
Aluminium	6,80	3,01	6,85
Fer	0,78	0,32	0,57

D'après L. Guillet, la présence d'une très faible quantité d'aluminium améliore considérablement les qualités de l'alliage ; peut-être ce métal joue-t-il ici le rôle de réducteur vis-à-vis des oxydes contenus dans le bain. La *charge de rupture* et la *dureté* croissent rapidement avec le pourcentage d'aluminium, passent par un maximum (vers 3-4 % Al) et décroissent ensuite ; le maximum est d'autant plus élevé que la teneur en cuivre est plus basse et il correspond à une teneur en aluminium d'autant plus faible que le pourcentage de cuivre est plus élevé. Il y a parfois discordance entre la dureté et la charge de rupture ; cela provient sans doute de ce qu'on est en présence de métaux fragiles.

On peut obtenir sur alliages coulés des charges de rupture atteignant de 70 à 75 kilogrammes, mais alors les *allongements* sont faibles (1 à 2 %).

Le *forgeage* modifie parfois considérablement la dureté, l'allongement et la charge de rupture ainsi que le montrent les chiffres ci-dessous qui concernent un maillechort à 82,2 % de cuivre, 2,50 % d'aluminium, 14,98 % de nickel, 0,23 % de zinc et 0,06 % de fer :

	Métal coulé.	Métal forgé et recuit.
Dureté	191	250
Allongement %	5	11
Charge de rupture	58,6	77,8

Ce sont là des propriétés très remarquables et même exceptionnelles pour un alliage de cuivre.

Emplois. — *Métal Victor.* — Cet alliage, employé surtout pour es machines marines grâce à sa grande résistance à l'eau salée et l'air marin, présente la composition suivante :

Cuivre	49,94 %
Zinc	34,27
Nickel	15,40
Aluminium	0,11
Fer	0,28

Il est plus blanc que le maillechort ordinaire, qu'il peut rempla-er dans nombre de ses emplois, mais il se travaille moins bien.

Argent d'aluminium. — L'alliage désigné sous ce nom, à cause de a belle couleur blanche, est surtout employé pour la fabrication des eviers et fléaux de balance. Il possède la composition suivante :

Cuivre	57 %
Zinc	20
Nickel	20
Aluminium	3

Il possède une grande dureté, est très tenace, prend un très eau poli, reste brillant à l'air et résiste ainsi à l'oxydation, pro-riété que ne possède pas l'acier.

Il ne coûte pas plus cher que le laiton ordinaire.

Pour le préparer, on fond d'abord le nickel et le cuivre en dditionnant le mélange de 2 % de borax ; puis on ajoute l'aluminium, on laisse refroidir et on n'ajoute le zinc que lorsqu'on est ertain qu'il n'y a plus de danger de pertes possibles de ce métal.

Alliage de Duke. — Cet alliage, remarquable par son bon marché, sa belle couleur blanche, sa malléabilité, sa ductilité, préente la composition suivante :

Cuivre	29,14 %
Nickel	19,16
Fer	50,30
Aluminium	1,40

Il résiste parfaitement à l'action des acides organiques végétaux et des agents atmosphériques, malgré sa teneur élevée en fer. Si on désire augmenter sa dureté, on peut, d'après l'inventeur, ajouter aux composants ci-dessus 1 à 2 % d'étain.

Alliages pour moulages et pièces mécaniques. — Le magnésium étant un épurateur énergique, il est parfois employé dans les maillechorts à l'aluminium, auxquels il communique de la dureté et de la résistance. Citons entre autres l'alliage suivant utilisé pour les moulages :

Aluminium	95,48 %
Cuivre	1,60
Magnésium	1,60
Nickel	1,16
Fer et antimoine	Traces

Pour la fabrication des organes de machines, de propulseurs, des appareils électriques, Brooke et Mackintosk ont imaginé un alliage aluminium-nickel-magnésium qu'on obtient de la façon suivante :

L'aluminium est d'abord fondu au creuset, puis refroidi. On ajoute de l'oxyde de nickel et on couvre avec un mélange de magnésie et de charbon de bois pulvérulent. Le creuset est alors chauffé à 1.600° environ, puis on ajoute du magnésium métallique en ayant soin de maintenir l'alliage fondu bien recouvert de matière réductrice pour éviter à la fois son oxydation et son ignition. Afin de favoriser la formation d'un alliage bien homogène, il est également nécessaire d'agiter les métaux fondus avec une tige de charbon avant d'ajouter le magnésium.

Les deux alliages suivants ont été proposés pour la fabrication des canons :

	N° 1	N° 2
Cuivre	31,30	33,33 %
Nickel	66,66	63,33
Aluminium	1,53	3,00
Silicium	0,17	0,33

Leurs propriétés mécaniques (résistance et allongement) sont les suivantes :

	Résistance à la rupture	Allongement.
	—	—
N° 1	74kg	33 %
N° 2	64 à 80	1 à 3

On a également étudié quelques alliages renfermant 2 % de nickel et 2 à 3 % de cuivre, le complément étant de l'aluminium. Ils ne présentent pas de sérieux avantages sur les alliages binaires aluminium-nickel bien qu'ayant été employés dans la fabrication des tôles pour yachts.

Les alliages ternaires aluminium-fer-nickel, utilisés depuis quelques années pour certaines applications spéciales, possèdent une grande résistance mécanique. On les prépare généralement en introduisant du ferro-nickel dans un bain d'aluminium. Ils ont été employés avec succès dans les constructions automobiles.

Maillechorts complexes. — Parmi les alliages plus complexes, il faut citer l'alliage *fer-nickel-cuivre-aluminium*, fabriqué aux usines d'Albertville et répondant à la composition suivante :

Fer	16 %
Nickel	30
Cuivre	2,6
Aluminium	2,9
Silicium	47,2

Il contient en outre, comme impuretés, 0,90 % de manganèse, 0,15 % de calcium, 0,57 % de magnésium et 0,02 % de phosphore. Il a été obtenu directement d'un minerai calédonien à 5 % de nickel. Ce minerai est, comme on le sait, la garniérite ou hydrosilicate de nickel et de magnésie, ce qui explique la composition de l'alliage résultant de son traitement.

Il existe enfin des *maillechorts spéciaux au chrome-nickel*, tel le suivant employé pour la fabrication des rhéostats électriques :

Aluminium	4 %
Nickel	88
Chrome	8

D'après M. Marsh, inventeur de cet alliage, l'addition d'aluminium double la résistance et entraîne une oxydation superficielle très

légère de l'alliage, ce qui empêche l'intérieur d'être atteint par cette oxydation.

Citons enfin un maillechort remarquable par sa dureté et sa résistance à la rupture et ayant la composition ci-dessous :

Cuivre	68 %
Nickel	15
Zinc	10
Chrome	3,5
Aluminium	3,5

On l'obtient de la façon suivante :

On fond pendant une heure un mélange de 5 kilogrammes de chrome et 5 kilogrammes d'aluminium, puis on ajoute 110 kilogrammes de cuivre. On porte le tout à la température de fusion pendant une demi-heure, puis le mélange, additionné de 25 kilogrammes de nickel, est maintenu également en fusion pendant une demi-heure. On termine en ajoutant à l'ensemble 20 kilogrammes de zinc.

D'après les inventeurs, on peut faire varier légèrement les proportions réciproques de cuivre et de chrome, mais l'ordre dans lequel les métaux doivent être fondus et la proportion d'aluminium sont invariables.

Cet alliage, qui aurait la dureté de l'acier, posséderait une résistance à la rupture de 40 kilogrammes.

CHAPITRE IV

ALLIAGES DE L'ALUMINIUM AVEC LES MÉTAUX USUELS

I. — Alliages d'aluminium et de zinc.

Constitution. — Ces alliages, qui tendent à avoir des applications intéressantes dans les constructions mécaniques, ont été peu étudiés jusqu'ici, mais on sait cependant qu'ils renferment un certain nombre de constituants. Leur diagramme d'équilibre, leurs propriétés mécaniques, leur constitution micrographique ont surtout été étudiés par Shepherd, Bancroft, Ewen et Turner, Smirnoff, Carpenter, Pécheux. Ce dernier notamment a préparé un grand nombre d'alliages définis dont nous allons d'abord indiquer les principaux caractères.

Au point de vue de la *couleur*, les constituants $AlZn^3$, $AlZn^2$, AlZn sont gris bleu ; Al^2Zn, Al^3Zn, Al^4Zn, Al^6Zn, $Al^{10}Zn$ et $Al^{12}Zn$ sont blancs. Les trois premiers sont peu sonores. Ils sont tous cassants. Les six premiers sont durs ; Al^6Zn, $Al^{10}Zn$, $Al^{12}Zn$, assez mous, se plient légèrement et se brisent ensuite sous un effort moyen. La pâte de tous ces alliages est grenue, à grains fins rappelant ceux de la fonte. Les trois premiers, $AlZn^3$, $AlZn^2$, AlZn, montrent quelques lamelles cristallines emprisonnées dans la pâte. Tous se liment facilement.

Au point de vue de la *fusion*, on constate que le point de fusion est intermédiaire entre ceux des métaux composants.

La *résistivité* électrique est supérieure à celle du métal le plus

résistant, sauf pour $Al^{12}Zn$; des recuits successifs ne la modifient pas sensiblement ; elle passe par un minimum, puis par un maximum, un nouveau minimum, un nouveau maximum et décroît ensuite d'une façon continue. C'est ce que montre le tableau suivant, dans lequel nous avons groupé les points de fusion et les chiffres représentant la résistivité à 0° :

ALLIAGES	POINT DE FUSION	RÉSISTIVITÉ A 0°	
		ρ^0	a
$AlZn^3$	410°	9,6	0,0007
$AlZn^2$	425	9,2	0,0005
AlZn	480	9,1	0,0007
Al^2Zn	530	8,7	0,0006
Al^3Zn	560	11,7	0,0004
Al^4Zn	580	8,7	0,0002
Al^6Zn	590	9,7	0,0003
$Al^{10}Zn$	600	8,3	0,0003
$Al^{12}Zn$	610	5,7	0,0003

Propriétés physiques. — *Fusibilité.* — Si l'on trace la courbe de fusibilité des alliages contenant de 100 à 0 % de zinc, on obtient deux branches se rencontrant en un point *m* (*fig.* 51) qui correspond à l'alliage renfermant 5 % d'aluminium, c'est-à-dire 95 % de zinc, et fondant à 389°.

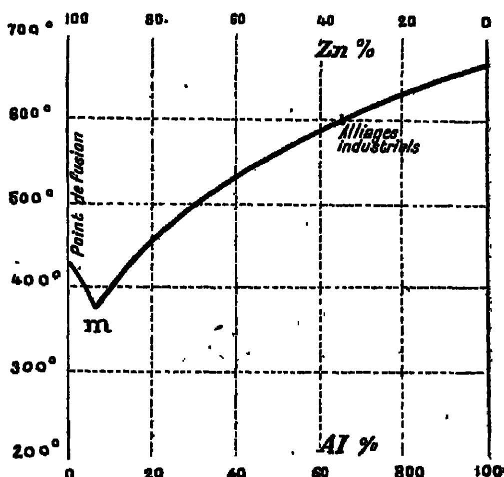


Fig. 51. — Courbe de fusibilité des alliages aluminium-zinc.

A mesure que la teneur en zinc diminue, la température de fusion monte, d'abord très rapidement, puis très lentement. La

courbe montre en effet que celle-ci s'élève de 70° seulement quand la proportion de zinc passe de 40 à 0 %. Il en résulte que tous les moulages industriels dont la teneur en zinc est comprise entre 10 et 30 %, et ce sont les plus nombreux, fondent à des températures comprises entre 600 et 630°. On peut admettre en pratique qu'ils fondent sensiblement à la même température. Cette considération est d'une certaine importance au point de vue de la soudure autogène des alliages zinc-aluminium; il en sera question plus loin (p. 179).

Dilatation. — La *dilatation thermique* de ces alliages est assez élevée. Nous donnons ci-dessous, d'après M. Smirnoff, les nombres représentant les coefficients moyens de dilatation linéaire entre 25° et 250° ;

Zn %	$\beta \times 10^6$	Zn %	$\beta \times 10^6$
100 % (Zn pur)	28,1	38,1	31,3
95,0	32,6	20,6	31,6
81,6	27,1	9,5	29,7
54,6	28,1	0 (Al pur)	27,2

Ces résultats concordent bien avec les données des analyses thermique et micrographique, qui montrent notamment l'existence du constituant Al^2Zn^3. Ce constituant Al^2Zn^3 apparaît très nettement dans certains alliages. La figure 52 le représente sur un fond d'eutectique sous forme d'une étoile à six branches dont les dendrites présentent des angles de 60°, contrairement à la plupart des métaux dont les dendrites ont des angles de 45 ou 90°. Cela fait considérer β comme un constituant bien défini. Le constituant α de ces alliages correspondrait au zinc pur ou plutôt à une solution solide de zinc et d'aluminium ou encore de zinc et d'un composé de zinc et d'aluminium. Un alliage à 1 % d'aluminium montre déjà une certaine quantité d'eutectique. La fig. 53 représente un alliage à 84 % d'aluminium refroidi jusqu'à une température voisine de 200° et trempé à cette température; on aperçoit le constituant β qui s'est formé par couches successives autour des cristaux primitifs.

La dilatation élevée des alliages zinc-aluminium présente un

certain intérêt pratique. On constate en effet que les meilleures coulées sont obtenues avec les alliages renfermant entre 40 et 60 % d'aluminium pour lesquels la dilatation est maximum ; il s'y ajoute cependant aussi la grande fluidité de ces alliages et leur tension superficielle moindre que pour les métaux purs.

Propriétés mécaniques. — Elles varient beaucoup suivant la teneur des composants et aussi suivant les traitements. Le forgeage, notamment, améliore considérablement les alliages renfer-

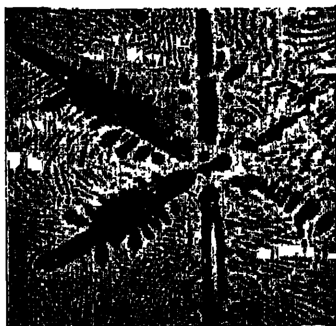


Fig. 52. — Alliage aluminium zinc montrant nettement le constituant β (Al^2Zn^3), sur un fond d'eutectique.



Fig. 53. — Alliage aluminium-zinc à 84 % d'aluminium, refroidi à 260° et trempé à cette température. Constituant β (Al^2Zn^3).

mant de 5 à 20 % de zinc. Les allongements sont augmentés dans la proportion de 1 à 10. Le recuit après forgeage diminue légèrement la résistance à la rupture, mais accroît encore les allongements; par contre, la limite élastique se trouve réduite. C'est ce que montrent les chiffres contenus dans le tableau suivant qui se rapportent à des alliages d'abord coulés en coquille sous forme de barreaux de 5 centimètres de diamètre, puis étirés par forgeage vers 350° jusqu'à 2 centimètres de diamètre. On a prélevé des éprouvettes de traction dans les barreaux bruts de forgeage et dans les barreaux forgés recuits pendant une heure à 300°. Les résultats indiqués sont des moyennes d'essais :

ALLIAGE Al %	ALLIAGE Zn %	TRAITEMENT	RÉSISTANCE A LA RUPTURE	LIMITE ÉLASTIQUE	ALLONGEMENT
94,7	5,3	Brut de coulée...	7kg,9	4kg,2	8,5 %
		Forgé	13 6	11 5	19
		Forgé et recuit...	9 6	2 5	30
89,8	10,2	Brut de coulée...	9 3	6 5	2,5
		Forgé	18 2	10 7	33,5
		Forgé et recuit...	14 8	4 5	38
84,0	16,0	Brut de coulée...	17 1	10 4	2
		Forgé	25 4	18 1	23
		Forgé et recuit...	23 2	7 5	28
79,0	21,0	Brut de coulée...	18 4	17 1	1
		Forgé	31 3	22 4	14
		Forgé et recuit...	31 5	21 4	14,5

Voici, d'autre part, les résultats obtenus avec un alliage à 87,7 % d'aluminium :

	Brut de coulée.	Forgé.
Résistance à la rupture.........	8kg,2	17kg,2
Limite élastique...............	11 ,7	22 ,0
Allongement %..............	3	12 ,4

Ces chiffres confirment nettement ce qui vient d'être dit au sujet du forgeage.

D'après Rosenhain et Archbutt, il faut toutefois insister sur un défaut de ces alliages, à savoir la facilité avec laquelle leur résistance à la rupture est influencée par une élévation de température. C'est ainsi qu'un alliage à 25 % de zinc, dont la résistance à la température ordinaire est de 43kg,3 par millimètre carré, n'a plus à 100° C. qu'une résistance de 28kg,5. Cette diminution ne fait que s'accroître avec une nouvelle élévation de température.

Les applications industrielles de ces alliages sont en outre limitées par leur *fragilité* sous l'influence de chocs répétés. Ils deviennent alors cristallins et cassants. Les ruptures constatées dans les carters d'automobile, pour la fabrication desquels on les utilise, sont dues, soit à des vibrations continues, soit, le plus souvent, à des chocs violents résultant, par exemple, de la rupture

d'une bielle. Les déchirures provoquées par ces accidents ne sont accompagnées d'aucune déformation sensible de la zone avoisinante, ce qui met en évidence le peu de souplesse du métal après un service quelque peu prolongé. Il se produit très souvent des fissures à travers lesquelles l'huile de graissage s'échappe; ces dernières se propagent avec rapidité dans l'alliage grâce à la structure cristalline qu'il acquiert, comme nous l'avons dit, lorsqu'il est soumis à des trépidations.

La température influe sur cette fragilité comme sur la résistance à la rupture. Une chauffe à 500 ou 550° rend ces alliages si friables et si peu résistants qu'elle peut amener la chute de partie d'une pièce si cette dernière est d'un poids assez considérable et placée en porte-à-faux. Le moyen le plus pratique de se rendre compte si cette température de 500-550° est atteinte est de gratter la surface de l'alliage avec une lime ou un couteau de fer; le métal présente un aspect gras et rend sous la lime un son mat dès qu'on atteint cette température critique de fragilité.

La *dureté* scléroscopique des alliages zinc-aluminium présente un minimum vers 30 °/₀ d'aluminium, encadré par deux maxima à 20 et 50 °/₀ de ce métal. Elle est aussi augmentée par le forgeage, mais non dans les mêmes proportions que la résistance à la rupture.

Résistance chimique. — Au point de vue chimique, la plupart de ces alliages se signalent par leur grande résistance vis-à-vis des agents atmosphériques; ils sont inoxydables à la température ordinaire et ni l'air sec ni l'air humide ne les attaquent. La potasse caustique étendue et froide les attaque plus vivement que l'aluminium pur; l'acide chlorhydrique agit de même. Mais l'action chimique la plus intéressante est celle qu'ils manifestent en présence de l'eau tenant en solution du sulfate de cuivre. Les alliages zinc-aluminium, en effet, qui ne décomposent pas l'eau à traces de chlorure de sodium [1], décomposent celle qui a reçu du sulfate de cuivre. L'eau de la solution de sulfate de zinc (densité : 1,4) n'est

1. Nous verrons plus loin que les alliages *magnésium-aluminium*, *bismuth-aluminium*, *étain-aluminium* décomposent rapidement une eau ne contenant que 17 milligrammes de chlorure de sodium par litre avec dégagement d'hydrogène.

décomposée que plus lentement. L'ordre et l'activité de ces décompositions correspondent bien à l'exothermie des solutions, la plus exothermique (sulfate de zinc) étant plus difficilement décomposable que celle du sulfate de cuivre, moins exothermique. Il y a dégagement d'hydrogène. Nous indiquerons plus loin (v. alliages *aluminium-magnésium*) à quelles causes il semble logique d'attribuer cette réaction originale.

Préparation. — M. Pécheux a obtenu des alliages aluminium-zinc de composition très variée par le mélange direct des deux métaux fondus dans un creuset en terre réfractaire. Dans le bain d'aluminium fondu on projette le zinc, on agite le mélange et on recouvre ce dernier de poussier de charbon pour éviter l'oxydation. On coule ensuite en baguettes cylindriques dans des moules en sable gras. Le mélange des deux métaux est assez difficile, car la grande chaleur latente de fusion du zinc (28,13 calories) produit, dès qu'il vient de fondre au contact de l'aluminium liquide, une solidification de toute la masse; il faut alors donner un coup de feu, et les deux métaux fondent à nouveau en se mélangeant aisément et dans toutes les proportions.

En fonderie, les deux métaux sont généralement fondus dans des creusets de graphite. On coule ensuite dans des moules en sable. Les changements de composition dus à la fusion sont relativement faibles. Cependant, en constate que les alliages riches en aluminium sont beaucoup plus difficilement exempts de soufflures que les autres. Ces accidents de soufflure disparaissent dès qu'on adopte la coulée en coquille. A partir de 30 $^0/_0$ de zinc on obtient des barreaux sains sans aucune précaution spéciale.

En raison de l'absorption facile du silicium par l'aluminium (Bancroft), il est préférable de ne pas faire usage de creusets en argile de Hess ou en graphite ordinaire, l'agglomérant étant l'argile. Le graphite pur artificiel convient, par contre, très bien. Bancroft a proposé de protéger la surface du métal contre l'oxydation par une arrivée de gaz d'éclairage. Les alliages riches en zinc obtenus par cette méthode présentent souvent une structure cristalline grossière, caractéristique du zinc coulé, ce qui est très défavorable à une bonne résistance mécanique. Cette structure, pour

des alliages de même composition, varie de la forme rayonnante habituelle jusqu'au grain fin et sensiblement régulier. Comme cette dernière est la meilleure au point de vue des propriétés mécaniques de l'alliage, il convient de trouver le moyen de la produire à volonté. On y est arrivé en coulant dans un moule très froid l'alliage à une température aussi voisine que possible de son point de solidification, soit 50° environ au-dessus de ce dernier. En fondant les métaux, il ne faut du reste jamais dépasser 700°, car au-dessus de cette température l'aluminium absorbe du carbone en quantité appréciable et risque de se transformer partiellement en carbure d'aluminium.

Le moule de coulée peut être en graphite artificiel comme celui de fusion. Il comprend deux parties maintenues par une gaine de métal. Dès qu'il est possible de l'ouvrir après solidification de l'alliage, on plonge celui-ci dans l'eau glacée. Les lingots obtenus dans ces conditions ont un grain plus fin et une résistance plus élevée que ceux préparés par les méthodes précédentes.

Emplois. — Les alliages zinc-aluminium les plus couramment utilisés dans l'industrie sont ceux titrant de 5 à 30 $^0/_0$ de zinc. Ils se moulent aisément, ce qui les a fait parfois utiliser pour l'ornementation. Jusqu'à 15 $^0/_0$ de zinc, ils sont très malléables et se laissent facilement travailler. A 30 $^0/_0$ environ de zinc, on obtient un alliage assez dur, de densité égale à 3,8, mais pouvant cependant être utilisé pour le moulage. Les alliages destinés à être laminés ou étirés ne doivent renfermer guère plus de 16 à 17 $^0/_0$ de zinc.

D'après Rosenhaim et Archbutt[1], les alliages d'aluminium et de zinc titrant de 15 à 25 $^0/_0$ de zinc sont comparables aux meilleurs aciers doux. Ils présentent en effet les caractéristiques mécaniques suivantes :

Résistance mécanique..............	42 kilogrammes
Limite élastique....................	39 —
Allongement........................	16,5 $^0/_0$

Leur densité est de 3,2 seulement. Ils sont donc susceptibles

(1) Rosenhaim et Archbutt, les alliages d'aluminium et de zinc (*Revue de Métallurgie*, juillet 1913, p. 823-854).

d'un grand nombre d'applications industrielles surtout si l'on ajoute qu'ils sont peu sensibles au choc et relativement peu altérables par corrosion.

Sous le nom de *ziskon*, on désigne un alliage contenant 25 % de zinc et 75 % d'aluminium, employé pour la construction des instruments de précision : sa densité est de 3,35.

L'alliage appelé *alzync* contient 2 parties d'aluminium pour 1 de zinc. On l'utilise en fonderie et pour remplacer le laiton. L'alliage renfermant 95 % de zinc et 5 % d'aluminium est utilisé pour la fabrication de certaines pièces de gramophone et de phonographe.

Plusieurs alliages zinc-aluminium sont également employés dans la construction des aéroplanes pour la fabrication des petites pièces coulées. Pour cette application, il est indispensable, en effet, de recourir à des pièces matricées, cette dernière opération s'effectuant très bien tant qu'on ne dépasse pas 20 % de zinc.

Pour la soudure de l'aluminium, on a aussi conseillé l'emploi des alliages renfermant du zinc dans la proportion de 80 à 96 %, le complément étant de l'aluminium. On applique au fer à souder en employant comme décapant un mélange de 30 grammes de baume de copahu, 10 grammes de térébenthine de Venise et quelques gouttes d'acide acétique.

Pour la fabrication des carters d'automobile, pièces de machines, moulages résistants et légers, on emploie des alliages répondant aux chiffres suivants :

Aluminium	85 à 90 %
Zinc	15 à 10

Ils renferment souvent de 0,5 à 1 % de cuivre et, comme principale impureté, des traces de silicium.

T. Bayliss et B. G. Clark ont breveté, en Angleterre, des alliages *aluminium-zinc-cadmium* doués de propriétés spéciales et dont la composition varie entre les limites suivantes :

Aluminium	99 à 80 %
Zinc	0,001 à 20
Cadmium	0,001 à 10

Ces alliages ont des propriétés que ne possèdent ni l'aluminium,

ni ses alliages. On remarque en particulier qu'en outre de sa plus grande résistance, il est malléable et peut se travailler dans toutes les conditions : il présente de plus une surface de coulée lisse qui peut être usinée facilement. Il convient pour l'estampage ou pour des travaux de même genre ainsi que pour la fabrication des feuilles, des fils, etc. Il peut être laminé sur de grandes longueurs variant de 30 à 60 mètres ou telles autres qui conviennent le mieux aux demandes du commerce. Les métaux composants peuvent être en toutes proportions, à condition toutefois qu'ils restent dans les limites indiquées ci-dessus. Voici deux compositions d'alliages données à titre d'exemple :

	N° 1	N° 2
Aluminium	91 %	88 %
Zinc	8	10
Cadmium	1	2

Ces deux alliages sont résistants et malléables au plus haut point lorsqu'ils sont moulés en coquille en vue du laminage. Quand ils sont moulés en sable, ils ont une surface lisse et peuvent être facilement usinés, tournés ou filetés.

Le procédé de préparation consiste à chauffer l'aluminium jusqu'à fusion et à y ajouter du zinc et du cadmium à l'état fondu avec ou sans fondant, de façon à obtenir la composition voulue. La masse entière est ensuite maintenue à l'état liquide jusqu'à ce que le zinc et le cadmium se soient régulièrement répartis dans toute la masse ; on laisse refroidir l'alliage qui est ensuite laminé et recuit.

Soudure des alliages aluminium-zinc. — La *soudure autogène* de ces alliages présente les mêmes difficultés que celle de l'aluminium pur, c'est-à-dire que l'on doit employer le même fondant pour la destruction de l'alumine qui prend naissance au contact du métal en fusion. Cependant les alliages zinc-aluminium ayant à l'état fondu une fluidité et une conductibilité calorifique plus faibles que celles de l'aluminium, les trous et les affaissements que l'on est exposé à provoquer par un écart insuffisant du dard du chalumeau sont beaucoup moins importants que ceux constatés avec l'aluminium (v. p. 42).

Il faut toujours prévoir la résultante des effets de dilatation et de

retrait; le coefficient de dilatation de ces alliages étant élevé, il arrive souvent qu'une réparation par soudure donne une pièce inutilisable par suite de la déformation d'une ligne de paliers.

Avant la soudure, les bords à réunir doivent être chanfreinés et grattés à vif. On peut arrêter les cassures, pour éviter leur prolongement au réchauffage préalable, en perçant à leur extrémité un trou qu'on bouche ensuite par soudure autogène.

Le réchauffage préalable a pour but d'éviter les ruptures dues à une dilatation inégale causée par des différences d'épaisseur de la pièce moulée. Il doit se faire à l'abri de l'air, autant que possible dans un four. On surveille constamment la pièce et on arrête la chauffe avant que la température critique (500-550°) soit atteinte pour éviter, comme nous l'avons dit, les ruptures par diminution de la résistance à cette température. On ne dépasse généralement pas 400°. En vue d'assurer un réchauffage uniforme, il faut disposer la pièce à une assez grande hauteur au-dessus du foyer calorifique. Si l'opération est bien conduite, il ne se produit aucune nouvelle cassure. En ce qui concerne la réparation des carters, le réchauffage a en outre pour effet de chasser l'huile de graissage dont l'alliage est imprégné et qu'il retient souvent en grande quantité grâce à sa porosité.

Le métal d'apport à utiliser doit avoir une composition sensiblement voisine de celle de l'alliage à souder ou à réparer. La courbe de fusibilité des alliages zinc-aluminium nous a montré que les moulages industriels renfermant de 5 à 30 % de zinc ont des points de fusion variant entre 600 et 630°; par suite, un métal d'apport renfermant une teneur moyenne en zinc ne présentera comparativement aux alliages industriels d'aluminium que des écarts maxima d'une dizaine de degrés dans la température de fusion, condition essentielle pour obtenir une bonne soudure autogène. La composition suivante (formule de l'Union de la soudure autogène) est celle qui a donné jusqu'ici les meilleurs résultats :

Aluminium	88 %
Zinc	10
Cuivre	2

Cet alliage, rendu bien homogène, est coulé en baguettes de grosseur appropriée aux réparations à exécuter.

On peut aussi se servir, pour la confection du métal d'apport, de moulages hors d'usage en alliages aluminium-zinc ; mais, en outre qu'on ne connaît pas leur composition exacte, il y a lieu de craindre l'introduction dans l'alliage à souder de crasses, corps étrangers ou impuretés. L'aluminium pur ne convient pas non plus, car il ne donne pas un joint véritablement autogène ; il en est de même, à plus forte raison, des nombreuses brasures ou soudures vendues dans le commerce sous le nom de « brasures pour moulages d'aluminium » ; elles ne produisent, le plus généralement, qu'un simple collage, sans résistance et sans cohésion.

Lorsque la soudure est terminée, la pièce est placée à nouveau dans le four encore chaud et on ne l'en retire que lorsque celui-ci s'est complètement refroidi de lui-même de manière à provoquer un refroidissement lent. Il ne reste alors qu'à l'usiner, c'est-à-dire à faire disparaître les aspérités et la surépaisseur de soudure à l'aide d'un burin, d'une lime ou d'une meule. Souvent, on termine en sablant la pièce de manière à lui donner l'aspect du neuf. La soudure est rendue ainsi invisible.

II. — Alliages d'aluminium et de magnésium.

Constitution. — Les alliages aluminium-magnésium ont été étudiés au point de vue de leur constitution par un certain nombre d'auteurs et notamment par Boudouard, Grube et Broniewski. Boudouard a isolé les combinaisons $AlMg$, $AlMg^2$ et Al^4Mg ; les deux premières correspondent à deux maxima de la courbe de solidification commençante, soit 462° et 455° ; la troisième a été trouvée par l'étude chimique de ces alliages. Grube n'a noté sur la courbe de fusibilité qu'un seul maximum pouvant correspondre, soit à Al^2Mg^3, soit à Al^3Mg^4, qui ne sont distants l'un de l'autre que de 3 °/₀. Broniewski a montré depuis, par l'étude de la force électromotrice de dissolution que c'est Al^2Mg^3 qui se forme. A la suite de nouvelles recherches, Grube a cependant confirmé l'existence de Al^3Mg^4.

D'après ce dernier auteur, l'examen micrographique permet d'observer les faits suivants :

Entre 0 et 35 °/₀ de magnésium, l'alliage est formé par des cris-

taux primaires d'aluminium entourés de cristaux mixtes saturés à 35 %. Vers 30 %, les cristaux d'aluminium affectent une forme dentritique que Boudouard fait correspondre au composé Al^4Mg;

Entre 35 et 54,5 % de magnésium, il se produit un conglomérat homogène de cristaux mixtes;

Entre 54,5 et 68 % de magnésium, on constate la présence du constituant Al^3Mg^4 sur un fond d'eutectique;

Enfin, entre 68 et 100 % de magnésium, il se forme des cristaux primaires de magnésium entourés du même eutectique.

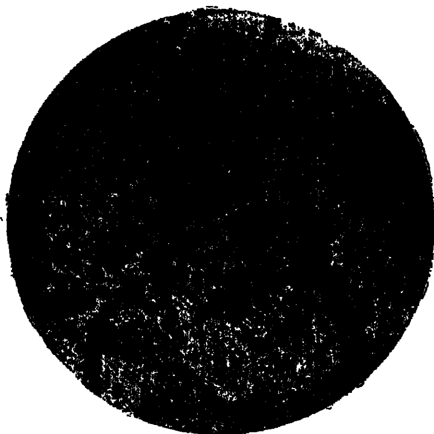


Fig. 54. — Alliage aluminium-zinc montrant le constituant $AlMg^2$. Attaque au chlorhydrate d'ammoniaque. — Gross. : 120 diam

L'alliage $AlMg^2$ (*fig.* 54), qui correspond à 36 % d'aluminium et 64 % de magnésium, a été obtenu à l'état cristallisé par Boudouard en traitant le produit de la fusion de 30 Al et 70 Mg par une solution de chlorhydrate d'ammoniaque à 10 %; cette dernière dissout le magnésium en excès et laisse l'alliage sous la forme d'une poudre métallique cristalline. Sa densité est de 2,03.

L'alliage AlMg se prépare de la même façon en traitant par le chlorhydrate d'ammoniaque à 10 % le produit de la fusion de parties égales des deux métaux. Sa densité est de 2,15. Il est remarquable par son extrême fragilité, car il peut être brisé entre les doigts et pulvérisé au mortier de porcelaine.

L'alliage Al^4Mg (*fig.* 55) correspond à 81,8 % d'aluminium et 18,2 % de magnésium.

Il s'obtient en traitant par de l'acide chlorhydrique étendu et froid le culot provenant de la fusion de 70 parties d'aluminium et 30 de magnésium. Sa densité est de 2,58.

L'alliage Al^3Mg^4 cristallise en formant des soufflures; il est blanc d'argent et très cassant.

Propriétés physiques. — La courbe de *fusibilité* des alliages aluminium-magnésium montre plusieurs maxima et minima suivant le pourcentage des éléments, ainsi que le montrent les chiffres ci-dessous :

Al $^0/_0$	POINT DE FUSION	Al $^0/_0$	POINT DE FUSION
100 (Al pur)	650°	66	420
85	565	50	462
77	480	40	450
73	458	35	452
70	432	25	356
68	410	0 (Mg pur)	635

Nous avons vu que c'est aux deux maxima 462° et 455° que correspondent les constituants AlMg et $AlMg^2$. Ces chiffres montrent aussi que les points de fusion sont tous moins élevés que ceux des deux éléments formant l'alliage.

Au point de vue de la *couleur*, les alliages d'aluminium et de magnésium ont presque tous une belle teinte blanc d'argent; ils sont durs et cassants et prennent un beau poli par la lime; la pâte est grenue, les grains étant très serrés, blanche dans les alliages aux environs de 60 à 70 $^0/_0$ d'aluminium, bleuâtre dans les alliages plus riches en ce métal.

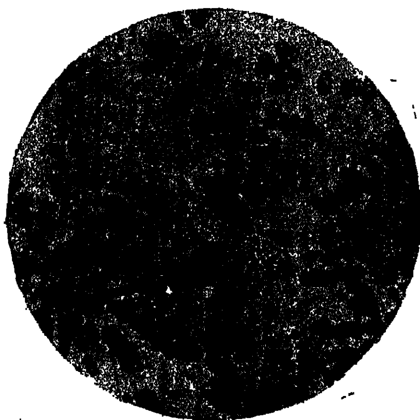


Fig. 55. — Alliage aluminium-zinc montrant le constituant Al^4Mg. Attaque au chlorhydrate d'ammoniaque. — Gross. : 120 diam.

La *densité* varie suivant le pourcentage des éléments et aussi suivant les traitements. Voici celle de l'alliage dit *magnalium*, qui renferme de 5 à 25 $^0/_0$ de magnésium :

	Densité.
Magnalium laminé	2,51
Magnalium trempé	2,49
Magnalium coulé	2,50

C'est donc un alliage très léger, la densité de l'aluminium pur étant de 2,56 et celle du magnésium de 1,75. Nous avons vu plus haut que le constituant $AlMg^2$ possède une densité encore plus faible que le magnalium, puisqu'elle ne dépasse pas 2,03.

La *résistivité électrique* est supérieure, dans ces alliages, à celle du métal le plus résistant. Des recuits successifs ne la modifient pas sensiblement. Voici les chiffres exprimant cette résistivité :

Al °/₀	ρ_0	a
66	64,8	néant
68	50,0	néant
73	19,2	0,0006
75	25,3	0,0004
85	14,8	0,006

Caractères chimiques. — Au point de vue *chimique*, l'acide chlorhydrique attaque vivement les alliages aluminium-magnésium, même à froid. Avec l'acide concentré, il y a projection de nombreuses parcelles métalliques incandescentes. L'air sec ou humide attaque tous les alliages à la température de la coulée. L'alliage à 54 °/₀ d'aluminium est particulièrement instable, car il s'altère au bout de quelque temps d'exposition à l'air.

Une solution de chlorure de sodium (17 milligrammes dans un litre d'eau distillée) est vivement décomposée par une baguette d'alliage aluminium-magnésium récemment limée [1] et qu'on immerge dans ce liquide. Il se produit un abondant dégagement d'hydrogène. Dans la solution aqueuse de sulfate de cuivre (densité : 1,1) la décomposition de l'eau est encore plus active et le sulfate est en même temps décomposé.

La réaction est beaucoup plus vive qu'avec les alliages aluminium-

[1] Nous avons vu précédemment, p. 54, que l'aluminium métallique limé attaque à peine les solutions de chlorure de sodium et de sulfate de cuivre.

zinc, les deux métaux, magnésium et aluminium, étant des réducteurs énergiques de l'eau.

On peut se demander s'il n'y a pas là une action catalytique due au cuivre précipité qui facilite la réduction du sulfate par l'excès d'hydrogène et rend ainsi libre la surface de l'alliage, permettant par suite la continuation de l'attaque. Avec un morceau de magnésium-aluminium à 85 °/₀ d'aluminium, les pesées montrent que le dégagement d'hydrogène de l'eau est dû uniquement au magnésium, l'aluminium réduisant simplement le sulfate de cuivre. D'après Pécheux, il n'y a pas, en effet, dans ce cas dépôt de cuivre, ce qui indique bien la non-réduction du sulfate par l'hydrogène. Il faut noter toutefois qu'un alliage aluminium-magnésium *non limé*, à surface polie et recuite, se recouvre en dix heures environ d'un dépôt très adhérent et très solide de cuivre; l'alliage à 85 °/₀ Al donne une épaisseur de $0^{mm},09$.

Propriétés mécaniques. — La *résistance mécanique* de ces alliages varie suivant les traitements. Nous donnons ci-dessous quelques chiffres se rapportant à des alliages à 2,3 et 10 °/₀ de magnésium :

MAGNÉSIUM	TRAITEMENT	RÉSISTANCE À LA RUPTURE	ALLONGEMENT
2 °/₀	Coulé au sable	$12^{kg},6$	3 °/₀
	Coulé et rapidement refroidi	20,1	2
	Coulé dans l'eau	28,1	1
10 °/₀	Coulé au sable	15	2,4
	Coulé et rapidement refroidi	23,6	3,4
	Coulé dans l'eau	43	4,2

Comme on le voit, la résistance à la rupture augmente considérablement par la trempe, quel que soit le pourcentage de magnésium entre 2 et 10 °/₀. Les allongements ne sont avantageusement modifiés que pour l'alliage à 10 °/₀.

Le forgeage avant étirage augmente aussi la résistance à la rupture de ces alliages. Il suffit du reste d'une très faible quantité de magnésium pour augmenter la résistance à la rupture de l'alumi-

nium, ainsi que le montrent les deux chiffres suivants donnés à titre de comparaison :

Magnalium à 2 % de magnésium laminé.....	36^{kg},9
Aluminium pur laminé....................	27 ,3

Il suffit de 0,5 % de magnésium pour communiquer à l'aluminium, par la trempe, une *dureté* considérable, mais cet effet ne se fait sentir qu'après un certain temps de repos. La trempe, à partir de 500°, suivie d'un écrouissage à froid, donne le maximum de dureté aux alliages aluminium-magnésium. Cette trempe agit du reste dans ces derniers d'une manière bien différente d'avec les aciers. L'alliage reste d'abord mou après la trempe, mais après quelques heures, sa dureté croît, rapidement au début, puis de plus en plus lentement, tout en restant cependant faible si on la compare à celle des bronzes au cuivre. La dureté croît avec la teneur de l'alliage en magnésium jusqu'à 35 % environ de cet élément.

Préparation. — On a cherché depuis longtemps à préparer des alliages d'aluminium et de magnésium. C'est ainsi que Wöhler, en 1866, tenta de les obtenir en fondant ensemble les deux métaux sous une couche de chlorure de sodium. En fondant le même mélange en présence de magnésie, Parkinson a obtenu un alliage renfermant 25 % de magnésium.

La préparation de ces alliages par l'union directe des éléments n'est cependant pas exempte de difficultés, car la très faible densité du magnésium rend difficile la pénétration et le mélange de ce métal avec l'aluminium. De plus, sa grande chaleur spécifique (0^{cal},215) rend la fusion difficile. Enfin, la facilité avec laquelle il brûle au contact de l'air, quand il arrive à une température voisine du rouge naissant, oblige à le maintenir au milieu de l'aluminium fondu à l'aide d'un dispositif spécial. Une baguette de fer peut servir dans ce but. Dans certaines installations, on utilise un tube en acier plongeant jusqu'au fond du creuset, c'est-à-dire au sein de l'aluminium fondu ; les morceaux de magnésium sont introduits dans ce dernier à l'aide d'un piston se mouvant dans le tube d'acier. Sans cette précaution, le magnésium forme à la surface de l'aluminium une sorte de scorie spongieuse qui s'oppose à l'obtention de l'alliage.

Les alliages fondus peuvent être coulés en baguettes de 9 à .0 millimètres de diamètre ; l'état pâteux des alliages riches en iluminium (60 à 85 $^0/_0$ Al), qui se rapproche assez de celui du verre ondu, ne permet pas de couler en baguettes plus minces.

Un procédé récent de préparation de ces alliages consiste dans 'électrolyse d'un bain fondu de magnésie ou d'oxychlorure de nagnésium dissous dans un fluorure de faible densité tel que e fluorure double de magnésium et de lithium. La cathode est n aluminium, de sorte que le magnésium mis en liberté s'unit ıvec ce dernier et forme l'alliage désiré. L'aluminium peut du 'este être produit au sein même le la réaction ; il suffit de remplacer la magnésie par un mélange en proportions déterminées l'alumine et de magnésie ; le procédé est alors continu.

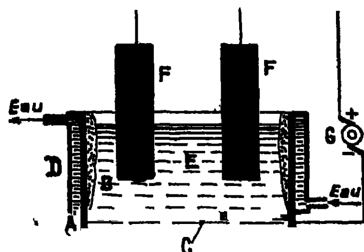


FIG. 56. — Appareil pour la préparation électrolytique des alliages aluminium-magnésium.

L'appareil se compose (*fig.* 56) d'un récipient A en fer refroidi extérieurement par une circulaion d'eau D. Il se produit ainsi à l'intérieur du récipient un dépôt B d'électrolyte qui protège l'appareil contre l'attaque de ce dernier E à l'état fondu. Les anodes F, en charbon, sont reliées à la machine génératrice de courant G. La cathode C, en aluminium fondu, est reliée à l'autre pôle.

Emplois. — Les alliages d'aluminium et de magnésium sont surtout connus et utilisés industriellement sous le nom de *magnalium*, mot formé de la réunion abrégée de ces deux métaux. Ils ont reçu dans ces dernières années des applications importantes comme alliages légers, pour la batterie de cuisine, la fabrication de certaines pièces de métiers de filature et de machines-outils, la sellerie, la chirurgie, les appareils de physique et de chimie. Ils présentent du reste de nombreuses qualités : ils résistent à l'oxydation beaucoup mieux qu'aucun des métaux ou alliages de faible densité, ne sont pas ou presque pas attaqués par l'humidité, l'air atmosphé-

rique, l'ammoniaque, l'acide carbonique, les acides organiques.

Le magnalium n'est pas magnétique; ses conductibilités thermique et électrique sont les 56/100es environ de celles du cuivre pur. Entre 5 et 30 % de magnésium, il possède à peu près les propriétés mécaniques du laiton ordinaire et sert pour la confection des vis, écrous, fils, etc.; sa dureté croît, comme nous l'avons vu, avec sa richesse en magnésium. Entre 35 et 50 % de magnésium, il est dur et cassant, mais prend un poli remarquable, ce qui l'a fait proposer comme métal à miroir.

La température généralement adoptée pour le travail à chaud du magnalium est d'environ 400°. A cette température il se laisse très facilement façonner à la forge, à la presse et au laminoir. Si l'on désire travailler à froid, on recuit préalablement l'alliage à 400° pour le rendre plus malléable; on le travaille alors, soit immédiatement après le recuit, soit seulement au bout de quelques jours.

Pour la fusion du magnalium, certaines précautions sont nécessaires. Le mieux est d'utiliser des creusets de graphite; ces derniers doivent être placés sur un support réfractaire pour éviter son contact direct avec la grille et, par conséquent, le courant d'air froid qui arriverait sur lui après la combustion du coke. Il est essentiel également de ne pas dépasser 625 à 650°, car à une température plus élevée, l'alliage risquerait de s'altérer et de perdre son homogénéité.

Certains alliages aluminium-magnésium ont été proposés comme alliages pyrophoriques, concurremment au ferro-cérium.

III. — Alliages binaires de l'aluminium avec l'étain, le plomb, le bismuth, l'antimoine et le nickel.

Alliages d'aluminium et d'étain. — *Constitution.* — Ces alliages ont donné lieu à de nombreuses recherches. Ils ont été étudiés au point de vue de la fusibilité par Gautier : la courbe possède un maximum correspondant au constituant Al Sn. D'après Shepherd, il y aurait une solution solide aux environs de 20 % d'étain. D'après Gwyer, on obtient un eutectique à 0,48 % seulement

uminium : son point de fusion est de 229°, c'est-à-dire inférieur
° à celui de l'étain pur.

.. Guillet a préparé différents alliages d'aluminium et d'étain par
minothermie (*fig.* 57) en réduisant le bioxyde d'étain par l'alu-
ium en grains. En faisant varier les proportions d'aluminium
excès, il a pu isoler les deux combinaisons AlSn et Al^4Sn. Le
aposé AlSn se présente sous forme, soit de lamelles malléables



Fig. 57. — Alliage aluminium-étain. Attaque par $S^2O^3Na^2$ et par voie électrolytique. — Gross. : 100 diam.

u de cristaux aciculaires, soit de cristaux filiformes de toute
eauté à pointements très nets. Sa densité est de 5,14. Le composé
l^4Sn se présente sous forme de poudre cristalline ou de lamelles
exagonales assez malléables. Il n'est ni dur, ni cassant. Sa den-
ité est de 3,75.

Au point de vue chimique, l'oxygène attaque facilement ces
ombinaisons entre 350 et 500°; leur surface se recouvre d'une cou-
he d'oxydes. L'eau réagit de la même façon. L'acide sulfurique
lilué ne produit rien à froid, mais à l'ébullition il a une action,
aible d'abord mais qui devient de plus en plus vive ; l'acide con-

centré produit une attaque violente. L'acide chlorhydrique même dilué donne une réaction très nette. L'acide nitrique agit très vivement à froid, mais les grains se recouvrent d'une couche de bioxyde d'étain et l'action n'est jamais complète. L'eau régale riche en acide chlorhydrique produit la dissolution rapide de ces composés. La potasse concentrée donne lieu à une réaction très vive. Le chlore agit activement vers 200 à 250°; il les décompose avec formation de tétrachlorure d'étain et de chlorure d'aluminium.

Préparation et propriétés. — En outre du procédé aluminothermique indiqué plus haut, on peut obtenir des alliages aluminium-étain en mélangeant simplement ces deux métaux. M. Pécheux a obtenu ainsi des produits non cristallisés répondant théoriquement aux formules suivantes : $AlSn^5$, $AlSn^3$, $AlSn^2$, Al^3Sn.

Ces différents alliages « crient » comme l'étain, sont cassants, surtout après plusieurs recuits ; $AlSn^5$ devient même pulvérulent. Leur pâte est striée, les stries étant d'autant plus fines que l'aluminium est en plus forte proportion. Ils sont mous et gras à la lime. Leur point de fusion est intermédiaire entre ceux des métaux composants, ainsi que le montrent les chiffres ci-après :

	Point de fusion.
Alliage $AlSn^5$	420°
— $AlSn^3$	480
— $AlSn^2$	530
— Al^3Sn	570

La résistivité électrique de ces alliages est supérieure à celle du métal le plus résistant, celle de l'étain étant de 14 microhms et celle de l'aluminium de 3^mcr,2. Voici les chiffres qui représentent la variation de cette résistivité :

	ρ0
Alliage $AlSn^5$	38,9
— $AlSn^3$	30,5
— $AlSn^2$	31,0
— Al^3Sn	25,1

Des recuits successifs augmentent encore cette résistivité ; cela est sans doute en rapport avec la modification engendrée par ce

traitement dans leur structure, les alliages recuits devenant cassants, comme il a été dit plus haut.

La potasse caustique étendue et froide, l'acide chlorhydrique, l'air humide attaquent tous ces alliages à la température ordinaire. L'action de l'eau est des plus curieuse et peut être mise en évidence par les expériences suivantes :

On plonge dans de l'eau distillée à 15° une baguette d'alliage aluminium-étain dont on vient de limer la surface. On obtient un abondant dégagement d'oxygène et d'hydrogène autour de la partie limée de la baguette. Le dégagement dure d'autant plus longtemps que l'usure à la lime a été plus longue; il s'arrête au bout de deux à trois minutes.

Une baguette de l'un des deux métaux composant l'alliage ne donne lieu à aucun phénomène analogue après qu'on l'a limée. De même, une baguette d'alliage non limée et chauffée à une température voisine de celle que produit le limage est sans action. M. Pécheux, auteur de ces constatations, explique la réaction par la formation d'un couple thermo-électrique entre l'aluminium et l'étain. Les alliages de ces deux métaux, immergés dans de l'eau froide après avoir été limés, constituent comme une série de minuscules éléments thermo-électriques. Les molécules d'étain et d'aluminium étant chauffées par la lime inégalement à cause de la grande différence de leurs chaleurs spécifiques ($0^{cal},218$ pour l'aluminium, $0^{cal},0562$ pour l'étain), il naît une force électromotrice qui s'annule quand les températures des deux sortes de molécules s'égalisent par le contact prolongé dans l'eau froide. L'analyse des gaz recueillis (oxygène et hydrogène) montre qu'ils sont bien dans la proportion de celle de la décomposition de l'eau par la pile.

L'eau distillée à l'ébullition est décomposée par une baguette d'alliage aluminium-étain non limée, comme si le recuit qui se produit à 100° détruisait la combinaison des deux métaux à la surface de l'alliage.

L'eau légèrement additionnée de sulfate de cuivre ou de sulfate de zinc est également décomposée. Avec le sulfate de cuivre, il se dégage des bulles d'oxygène, et du cuivre se dépose sur la partie de la baguette non limée. Or une baguette d'aluminium ou d'étain précipite bien le cuivre du sulfate, mais il ne se dégage pas de

gaz. La théorie de M. Pécheux semble donc en tous points vraisemblable.

Emplois. — Les alliages aluminium-étain ont été proposés par Bourbouze dès 1884 pour la fabrication d'objets durs et résistants quoique malléables, notamment les deux suivants :

	N° 1	N° 2
Aluminium	83,3 %	90,9 %
Étain	16,7	9,1

La résistance à la rupture de ces alliages peut atteindre de 36 à 38 kilogrammes. Celui à 9,1 % d'étain jouit d'une malléabilité et d'une dureté telles que 10 balles de revolver d'ordonnance, tirées à 10 mètres sur une plaque de 4 millimètres d'épaisseur formée de cet alliage ne donnent lieu, à incidence normale, qu'à de fortes dépressions ; à 45°, il ne se produit que de simples mouchetés, mais dans aucun cas la plaque n'est percée. Son poids n'est, à épaisseurs égales, que le tiers environ de celui d'une plaque semblable en acier chromé. Sa densité est de 2,85. Il possède une belle couleur blanche et se soude aisément. Malheureusement il s'altère facilement par l'action des agents atmosphériques. L'alliage à 3 % d'étain a une densité de 3,23 et présente une grande facilité de moulage. On l'utilise surtout pour l'ornementation.

Certains alliages, notamment ceux à 25 % et 50 % d'étain, sont employés pour la soudure de l'aluminium.

Alliages d'aluminium et de plomb. — D'après C. Wright, le plomb et l'aluminium formeraient deux couches non miscibles à l'état liquide : la couche supérieure renferme de l'aluminium et une très faible proportion de plomb, soit 1,91 % ; la couche inférieure, très riche en plomb, ne contient que des traces d'aluminium, soit 0,07 % environ.

D'après Pécheux, les alliages d'aluminium et de plomb ne paraissent possibles qu'à partir de la teneur de 90 % d'aluminium, sans doute à cause de la grande différence de densité de ces métaux. Pour les obtenir, il faut porter le bain d'aluminium à 800° ou 850° au moment d'y projeter le plomb ; on agite le mélange à l'aide d'une

baguette de fer immédiatement avant de le couler, pour éviter la liquation. Ce sont du reste de simples mélanges, mal définis ; en effet, si on les refond et si on les coule à nouveau, leur pourcentage d'aluminium diminue par suite de la liquation.

Pour des alliages renfermant environ 90 % d'aluminium, on constate la formation de trois lingots superposés de la façon suivante : celui du bas est formé de plomb, l'intermédiaire par un alliage plomb-aluminium, celui du haut par de l'aluminium. La teneur en ce dernier métal du lingot intermédiaire varie entre 90-97 %.

Ces alliages, lorsqu'ils peuvent être obtenus homogènes, sont assez cassants et à structure grenue : le grain est d'autant plus fin que l'aluminium est en plus forte proportion dans le mélange. Ils ont la couleur de l'aluminium, quoique avec un peu moins d'éclat. Leur température de fusion est voisine de celle de l'aluminium pour les alliages riches en ce métal, ainsi que le montrent les chiffres ci-dessous :

Al %.	Point de fusion
92	645°
94	652
96	635

La résistivité électrique est intermédiaire entre celles des métaux composants : 10,7 pour l'alliage à 92 % d'aluminium, 14,6 pour celui à 93 % et 7,9 pour celui à 96 %. Des recuits successifs augmentent cette résistivité.

La potasse caustique étendue et froide attaque ces alliages plus vivement que l'aluminium pur. L'acide chlorhydrique les attaque tous rapidement à la température ordinaire. L'air sec ou humide ne paraît pas les oxyder à froid. Ils ne décomposent pas l'eau pure à traces de chlorure de sodium, comme le font les alliages étain-aluminium, bismuth-aluminium, magnésium-aluminium ; mais, de même que les alliages zinc-aluminium, ils décomposent celle qui a dissous du sulfate de cuivre. L'eau qui a dissous du sulfate de zinc (densité : 1,04) n'est décomposée que plus lentement.

Alliages d'aluminium et de bismuth. — L'aluminium et le bismuth ne sont solubles l'un dans l'autre que d'une façon très res-

treinte. Cette solubilité diminue avec la température et n'est pas sensible au point de fusion du bismuth. Dans les alliages renfermant de 2 à 80 % (atom.) de bismuth, Gwyer a toujours constaté la présence de deux couches : l'inférieure, qui renferme la presque totalité du bismuth avec quelques cristaux d'aluminium ; la supérieure, formée en majeure partie d'aluminium avec de gros cristaux de bismuth disséminés surtout à la base.

Le point de fusion de l'aluminium est abaissé de 5° par l'addition de 3,7 % de bismuth. Il se forme sans doute une solution saturée de bismuth dans l'aluminium. Mais même à 1.200°, il n'y a pas trace de combinaison définie, alors même que la chauffe est prolongée pendant une heure et qu'on agite constamment. Il est du reste impossible, d'après Pécheux, d'obtenir un alliage homogène, et sans liquation, à moins de 70 % d'aluminium, et il faut agiter convenablement le mélange des deux métaux avant de couler.

Les alliages obtenus dans ces conditions sont alors homogènes. Ils ont une couleur blanc bleuâtre, sont assez cassants (notamment ceux à 88 % et à 94 % d'aluminium) ; ils plient à 120° environ. La pâte est à grains fins avec quelques lamelles cristallines dans ceux à 75 % et 85 % d'aluminium. Ils se liment facilement et sont assez malléables.

Ils sont moins fusibles que l'aluminium, qui est pourtant le moins fusible des deux métaux composants l'alliage. Leur résistivité est intermédiaire entre celles des deux composants et très éloignée de celle de l'aluminium. Les chiffres ci-dessous donnent la variation de ces différentes valeurs pour les alliages riches en aluminium :

Al %	POINT DE FUSION	RÉSISTIVITÉ A 0° (ρ_0)
75	719°	6,2
85	674	7,2
88	664	6,1
94	650	7,3

Au point de vue chimique, la potasse caustique étendue et froide attaque ces alliages plus énergiquement que l'aluminium. L'acide

sulfurique, dans les mêmes conditions, les attaque au contraire moins énergiquement. L'acide chlorhydrique réagit vivement à la température ordinaire. Avec l'eau chargée de chlorure de sodium ou de sulfate de cuivre, il se produit, comme avec les alliages d'étain, un abondant dégagement gazeux. Avec le sulfate de cuivre (densité : 1,1), l'alliage à 75 °/₀ d'aluminium fournit 15 centimètres cubes d'hydrogène en vingt minutes, soit trois fois plus que l'alliage Al^3Sn de même volume.

Alliages d'aluminium et d'antimoine. — *Constitution.* — La courbe de fusibilité de ces alliages, établie par Gautier, présente deux maxima auxquels correspondent les combinaisons AlSb et $Al^{10}Sb$ (*fig.* 58). La combinaison AlSb, isolée par Wright, est caractérisée par son point de fusion très élevé, voisin de celui du cuivre.



Fig. 58. — Alliage aluminium-antimoine montrant des cristallites de $Al^{10}Sb$. Polissage en bas-relief. — Gross : 100 diam. (D'après L. Guillet.)

Par l'aluminothermie, M. Guillet a pu obtenir et isoler le constituant $Al^{10}Sb$. Il se présente sous forme d'une poudre noirâtre, brillante, ayant pour densité 2,70 à 20° et fondant vers 1.050°. L'air ne paraît pas avoir d'action sur lui à la température ordinaire, mais il y a oxydation rapide vers 150°. L'acide sulfurique dilué l'attaque facilement. L'acide nitrique ne le dissout qu'à chaud. L'acide chlorhydrique produit une réaction extrêmement vive à froid et le dissout très rapidement. La potasse agit aussi à froid, le chlore vers 250°. Les cristaux, introduits dans de l'eau que l'on fait bouillir, produisent un dégagement d'hydrogène; si on laisse refroidir, le dégagement continue, mais d'une façon plus lente; on obtient même parfois de l'hydrogène antimonié.

Préparation. — On peut obtenir des alliages bien fondus d'aluminium et d'antimoine par la fusion directe de ces deux métaux au creuset, mais cette préparation demande certaines précautions.

Si on fond d'abord l'aluminium et si on jette l'antimoine métallique sur le métal liquide, l'antimoine tombe au fond du creuset (sa densité est de 6,7) où il se rassemble et fond ensuite. Si on laisse refroidir sans agiter le mélange, on recueille deux culots distincts, l'un contenant tout l'aluminium, l'autre tout l'antimoine. Mais si l'on prend soin d'agiter, le mélange s'effectue parfaitement quoique avec une augmentation de volume très notable. En partant d'un mélange en proportions convenables pour obtenir AlSb, on obtient un culot ayant pour densité 4,18 à 20°, alors que la densité théorique de AlSb est de 5,20.

La réduction de l'acide antimonique et du protoxyde Sb^2O^3 par voie aluminothermique donne des résultats variables ; la réaction s'effectue généralement avec une extrême violence et la masse est parfois projetée hors du creuset.

Propriétés. — L'alliage fondu correspondant à la formation théorique de AlSb est noirâtre et tombe rapidement en poussière au contact de l'air. Il décompose l'eau à froid en donnant de l'hydrogène et de l'hydrogène antimonié. Les alliages riches en aluminium, notamment ceux en renfermant de 87 à 90 °/₀ se comportent au contraire très bien. M. Pécheux a observé qu'après plus de deux ans ils conservaient le même aspect, la même densité et la même ténacité.

Par suite d'un phénomène particulier de capillarité, les alliages riches, obtenus en coulant la matière fondue dans un moule en sable, ne peuvent donner des baguettes homogènes d'un diamètre inférieur à 6 millimètres; le moulage est impossible avec une section moindre, l'alliage devenant très vite pâteux à la coulée.

Ces mêmes alliages riches sont caractérisés par leur grande malléabilité. Ils se plient assez bien, mais se laissent limer difficilement. Le recuit les rend cassants.

Leur pâte est grenue et présente une couleur blanc bleuâtre ; on y distingue quelques fines lamelles cristallines. Ils ne deviennent jamais pulvérulents, même après plusieurs recuits.



Fig. 59. — Alliage aluminium-nickel montrant le constituant AlNi.
(Attaque par polissage en bas-relief.)

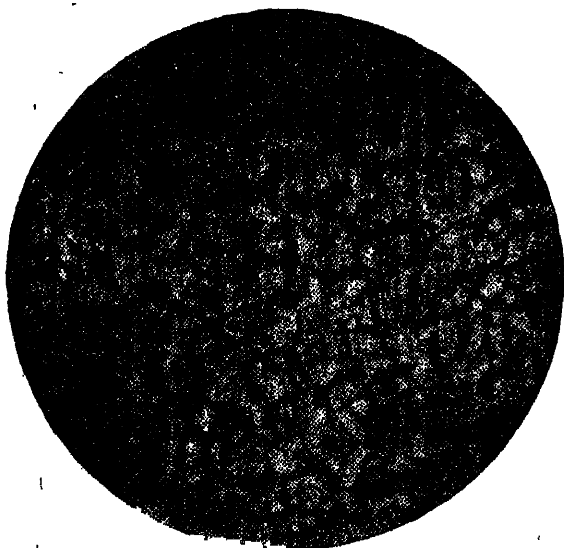


Fig. 60. — Alliage aluminium-nickel montrant le constituant $AlNi^2$.
(Attaque par acide nitrique étendu.)

Le point de fusion des alliages aluminium-antimoine est plus levé que celui de l'aluminium, mais il baisse en même temps que a teneur en antimoine, bien que cet élément n'ait pas la même empérature de fusion que l'aluminium ; il fond à 440°. Voici uelques chiffres résultant des déterminations de Gautier (1901) :

Al °/₀.	Point de fusion
48	970°
89	800
91	734

Van Aubel (1895) a trouvé 1.080° comme point de fusion de l'aliage à 19,4 °/₀ d'aluminium auquel correspond la formule AlSb.

Voici, d'autre part, les chiffres obtenus par Pécheux (1905) :

Al °/₀.	Point de fusion
87,5	740°
89	725
89,8	720
90,3	721

La résistivité électrique est intermédiaire entre celles des métaux composants :

Al °/₀.	ρ_0.
87,5	31,8
89	19,4
89,8	22,8
90,3	17,3

Le grand écart entre ces chiffres est l'indice d'une faible homogénéité pour plusieurs de ces alliages. Des recuits successifs ne modifient pas sensiblement la résistivité.

Ces alliages sont plus faiblement attaqués par la potasse caustique et par l'acide sulfurique étendus et froids que l'aluminium pur. L'acide chlorhydrique les attaque tous vivement. Ils sont inoxydables à la température ordinaire et à l'air sec.

Emplois. — Les seuls alliages susceptibles de quelque emploi sont ceux renfermant moins de 5 °/₀ d'antimoine qui se laissent

très bien fondre et laminer. L'alliage Alzugaray, qui renferme 81,63 % d'antimoine et 18,37 % d'aluminium et dont le point de fusion est assez élevé, n'a pas encore d'application, malgré le brevet pris il y a quelques années par son inventeur.

Alliages d'aluminium et de nickel. — *Constitution et préparation.* — Michel et Wöhler ont obtenu un composé répondant à la formule Al^6Ni en fondant un mélange d'aluminium, de chlorure de nickel sublimé et un mélange de chlorures de potassium et de sodium. Cette combinaison se présentait sous forme de grandes lames cristallines d'un blanc d'étain. Guillet a pu obtenir ce même composé (*fig.* 61) par l'union directe des deux éléments en proportions convenables. Ces métaux étaient placés dans un petit creuset brasqué que l'on plongeait dans une masse de ferro-chrome en fusion.

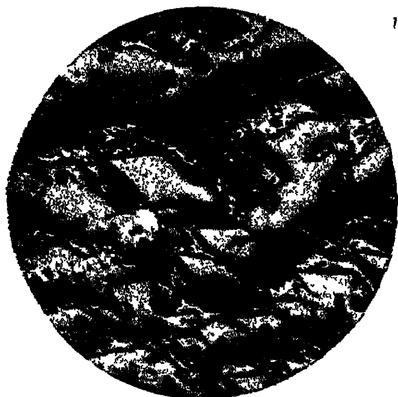


Fig. 61. — Alliage aluminium-nickel montrant le constituant Al^6Ni. Polissage en bas-relief. — Gross : 100 diam. (D'après L. Guillet.)

La réduction de l'oxyde de nickel par l'aluminium a permis à ce même savant d'isoler les composés AlNi (*fig.* 59) Al^2Ni, $AlNi^2$ (*fig.* 60) et $AlNi^3$. Le constituant Al^2Ni se présente, soit à l'état de poudre cristalline de teinte gris d'acier, soit sous forme de lamelles cristallines très malléables ; sa densité est de 4,11. Le constituant $AlNi^2$ a une couleur légèrement dorée ; il est si dur que la lime n'arrive pas à l'user et qu'on ne peut ainsi le réduire aisément en poudre fine. Le constituant $AlNi^3$ a pour densité 7,37.

Au point de vue chimique, ces alliages ne sont décomposés par l'oxygène qu'à haute température. L'eau les attaque vers 300°. L'acide sulfurique les dissout lentement. L'acide chlorhydrique agit lentement sur $AlNi^2$ et $AlNi^3$, mais très rapidement sur Al^2Ni et Al^6Ni. Au contraire, l'acide nitrique dissout lentement ces deux



Fig. 62. — Alliage aluminium-nickel à 15 % d'aluminium et 85 % de nickel, refroidi après 16 heures de chauffage vers 1350°. (Attaque par Cl^6Fe^2.)

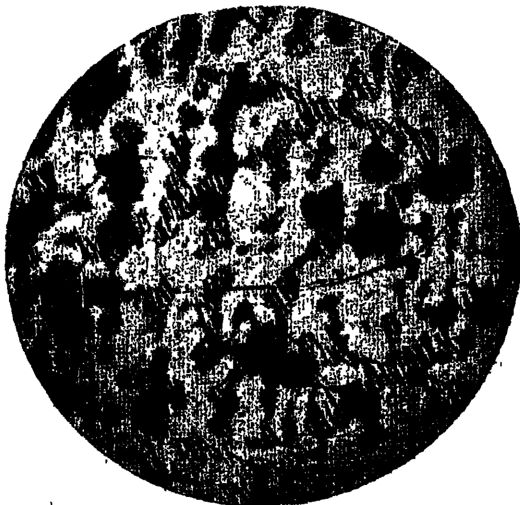


Fig. 63. — Alliage aluminium-nickel à 18,75 % d'aluminium et 81,25 % de nickel, trempé après chauffage de 1 heure vers 1250°. (Attaque par Cl^6Fe^2.)

derniers et très rapidement $AlNi^8$. Le chlore attaque tous ces alliages à chaud.

La combinaison Al^3Ni a été trouvée par Brunck à la suite d'études chimiques sur les alliages aluminium-nickel.

Par suite de l'énorme dégagement de chaleur qui se produit entre 40 et 90 $^0/_0$ de nickel quand on fond ensemble ces deux métaux, Gwyer conseille de fondre d'abord l'aluminium et, après l'avoir porté à 1.350°, de l'additionner progressivement de nickel. On chauffe ensuite le mélange vers 1.650°, température qu'il est nécessaire d'atteindre en raison du point de fusion élevé de certains de ces alliages.

L'étude microscopique des alliages aluminium-nickel permet de constater les faits suivants :

D'après Gwyer, de 100 à 87 $^0/_0$ de nickel, il se dépose des cristaux mixtes ; de 87,5 à 81 $^0/_0$ de nickel on observe à 1.370° des points critiques de très faible durée ; il y aurait donc, après solidification deux sortes de cristaux. Cependant l'alliage à 85 $^0/_0$ de nickel (*fig.* 62) devient homogène après un séjour d'un quart d'heure à 1.250° ; mais chauffé ensuite un quart d'heure à 1.350°, il redevient non homogène.

D'après Guillet, entre 100 et 95 $^0/_0$ de nickel, on obtient de vastes cellules qui semblent indiquer une solution solide. Aux environs de 90 $^0/_0$, on trouve un eutectique. Entre 90 et 80 $^0/_0$, on voit des cristaux correspondant au constituant $AlNi^2$.

Entre 80 et 50 $^0/_0$, la métallographie ne donne aucun renseignement, les alliages étant impossibles à polir. Au-dessous de 50 $^0/_0$ et jusqu'à 30 $^0/_0$, on rencontre les cristaux de la combinaison Al^6Ni.

Propriétés. — Les alliages aluminium-nickel jouissent d'importantes qualités. Leur résistance mécanique est de deux à trois fois plus élevée que celle de l'aluminium ; ils sont plus blancs et plus brillants que ce métal tout en étant aussi inaltérables.

C'est au voisinage de 2 $^0/_0$ de nickel que ces alliages possèdent la résistance à la rupture la plus élevée. Au delà de 5 à 6 $^0/_0$ de nickel, il y a abondance du constituant Al^6Ni ou de l'eutectique Al^6Ni - Al et l'alliage devient fragile. Les alliages très riches en

nickel, ceux par exemple contenant de 90 à 95 °/₀ de métal, sont si durs qu'on ne peut même pas les travailler avec des limes en acier au chrome sans qu'il y ait entraînement de fer; ils sont cependant malléables. Ceux contenant entre 50 et 80 °/₀ de nickel tombent lentement en poussière.

Voici les résultats obtenus par M. Guillet avec un alliage à 2 °/₀ de nickel dont le laminage est très facile:

—	Résistance à la rupture	Allongement.
Alliage recuit à 450°	19kg	20 °/₀
Alliage non recuit	32	12

Au point de vue du magnétisme, on constate que la perméabilité diminue beaucoup lorsque la teneur en nickel de l'alliage passe de 100 à 85 °/₀. Elle est même si faible autour de 80 °/₀ de nickel qu'il est difficile de voir à quelle combinaison il doit être attribué et de quelle façon il croît ou décroît.

Emplois. — Le nickel est le métal le plus généralement employé pour durcir l'aluminium.

Les alliages de ces deux métaux sont employés concurremment à l'aluminium pur pour la fabrication de nombreux objets d'usage courant. On les utilise sous forme de tôles, tubes, fils pour ligatures, profilés pour constructions. A l'état d'articles fondus, on les emploie pour le bâtiment, la quincaillerie, la décoration artistique, les objets d'art et les médailles. Ils sont fréquemment additionnés d'une certaine quantité de cuivre, de tungstène, de zinc. Ils donnent alors naissance aux maillechorts complexes, dont il a été question précédemment (v. p. 164 et suiv.).

CHAPITRE VII

ALLIAGES DE L'ALUMINIUM AVEC LES MÉTAUX RARES OU SPÉCIAUX

Alliages d'aluminium et d'argent. — *Constitution.* — Ces alliages ont fait l'objet de plusieurs recherches au sujet de leur constitution, mais les différents auteurs qui les ont étudiés ne sont pas entièrement d'accord sur la nature de leurs constituants.

En 1907, Pouschine, en étudiant la force électromotrice de dissolution, trouva la combinaison AlAg qui prend naissance à 45 % environ d'aluminium. Broniewski (1910) conteste son existence parce que l'alliage de cette composition montre au microscope une structure hétérogène et ne peut pas être ainsi un constituant défini.

La courbe de fusibilité de ces alliages a laissé supposer à H. Gautier l'existence de la combinaison Al^4Ag^3 qui correspond à un maximum de la courbe. A la suite d'une étude analogue Petrenko a admis l'existence des composés $AlAg^2$ et $AlAg^3$ qui occupent des maxima sur la courbe de fusibilité. Quand on ajoute de l'aluminium à de l'argent, on constate en effet que le point de fusion tombe jusqu'à un minimum à 567°, puis atteint deux maxima, l'un à 771° auquel correspond $AlAg^3$ pour l'alliage à 7,72 % d'aluminium, l'autre à 721° auquel correspond $AlAg^2$ pour l'alliage à 11,15 % d'aluminium.

Entre 0 et 7,72 % d'aluminium, il se dépose des cristaux mixtes riches en argent et dont la concentration maximum en aluminium est 4 %. La structure de ces alliages est donnée par la fig. 64

Pour 7,72 % d'aluminium, l'alliage cristallise à une température constante, ce qui indique l'existence d'un composé défini.

Entre 7,72 % et 11,15 % d'aluminium, les deux constituants $AlAg^3$ et $AlAg^2$ forment une série continue de cristaux mixtes.

Entre 11,50 et 30 % d'aluminium, se dépose le composé $AlAg^3$ et entre 30 % et 100 % d'aluminium, le métal pur.

L'étude des propriétés électriques (conductivité, coefficient de température, pouvoir thermo-électrique) a permis à Bronieswki de confirmer l'existence de $AlAg^3$ et, en outre, de trouver le constituant Al^2Ag^3. Ce constituant est généralement englobé dans des solutions solides; sa présence est nettement confirmée par la micrographie.



Fig. 64. — Alliage aluminium-argent à 6 % d'aluminium et 94 % d'argent, sans attaque. — Gross : 30 diam.

Préparation et propriétés. — Les alliages aluminium-argent n'ont été obtenus jusqu'ici que par l'union directe des éléments. La préparation des alliages riches en argent offre seule quelques difficultés. En effet, si l'on ajoute de l'aluminium à de l'argent fondu, le premier surnage en raison de sa faible densité et, étant très oxydable, se recouvre d'une pellicule d'alumine qui rend très difficile l'obtention d'alliages homogènes. Le mieux est d'ajouter par petites quantités l'argent à l'aluminium fondu en prenant soin d'agiter sans interruption.

Ces alliages sont doués de propriétés intéressantes. Ils sont durs, peu altérables et ne présentent pas la zone fragile propre à la plupart des alliages contenant des composés définis. Ceux contenant

moins de 4 % d'aluminium et de 7,72 % à 11,3 % de ce métal prennent facilement un beau poli parce qu'ils sont constitués par un seul élément structural. Ceux renfermant moins de 7,72 % d'aluminium montrent une grande stabilité et une grande résistance aux influences atmosphériques. L'alliage à 5 % Ag a une densité de 2,79 et celui à 10 % Ag, de 2,90.

Nous donnons ci-dessous les résultats d'essais à la traction et d'allongement sur ces deux alliages, à l'état de tôles laminées et non recuites :

Ag %	Résistance à la rupture.	Allongement.
5	24 kilogrammes	3 %
10	31 —	2

Il est du reste reconnu que l'argent augmente la charge de rupture de l'aluminium ; celle-ci ne serait que de 18 kilogrammes dans les conditions de l'essai ci-dessus. Il en est de même de la dureté, qui croît même avec un très faible pourcentage d'argent.

Emplois. — Parmi les emplois industriels de ces alliages, il faut d'abord citer la construction de certains appareils de physique et notamment des fléaux de balance ; on utilise dans ce but un alliage renfermant 3 % d'argent et 97 % d'aluminium ; il possède une belle couleur blanche. L'alliage à 5 % d'argent a été proposé à différentes reprises pour la fabrication de la monnaie divisionnaire.

Sous le nom d'*argental*, on désigne un alliage dû à Adams et qui renferme des quantités d'argent variables mais toujours très faibles. On l'emploie surtout pour l'horlogerie et l'orfèvrerie. Il est blanc comme l'argent et non bleuté comme l'aluminium, plus résistant mécaniquement que chacun de ces deux métaux pris isolément et doué d'une grande légèreté ; son poids spécifique n'est en effet que le tiers de celui de l'argent, soit 3,5 environ. Les alcalis et l'acide nitrique n'ont aucune action sur lui ; l'air humide ne l'attaque pas. Il se laisse travailler avec facilité ; on peut aussi le fondre, le mouler, le tourner et le fraiser sans difficultés. Sa ductilité est suffisante pour qu'on puisse l'étirer en fils très fins.

Alliages d'aluminium et d'or. — Ces alliages n'ont été jusqu'ici que peu étudiés. D'après Heycock et Neville, qui ont établi leur

diagramme de fusibilité, il existe différentes combinaisons définies de ces deux métaux, notamment $AlAu^4$, Al^2Au et AlAu. L'examen micrographique confirme du reste leur existence. Le composé $AlAu^4$ se présente en cristaux aciculaires de couleur jaune pâle et AlAu sous forme de cristaux blancs. Le composé Al^2Au est attaqué par l'acide chlorhydrique. Il contient 22 °/₀ d'aluminium. Il fond entre 1.065 et 1.070° C, c'est-à-dire 25 à 30° au-dessus de la température de fusion de l'or et fait par suite exception à la loi de fusion sur les alliages qu'un alliage est toujours plus fusible que le moins fusible des métaux qui le composait. Nous avons vu qu'il en était de même de l'alliage aluminium-antimoine AlSb (p. 199). De faibles quantités d'aluminium ont cependant pour effet d'abaisser le point de fusion de l'or (Van Aubel); au-dessous de 10 °/₀ d'aluminium, ce point est abaissé pour commencer à s'élever au-dessus de cette limite.

Le seul alliage binaire or-aluminium actuellement connu est celui désigné sous le nom de *bronze or-aluminium* qui correspond à la composition suivante :

Aluminium.	22 °/₀
Or.	78

Il est dû à Hunt qui l'a lancé pour la bijouterie. Il possède une belle couleur pourpre.

Alliages d'aluminium et de platine. — *Constitution.* — En 1896, Margot a obtenu un alliage de couleur jaune doré en fondant dans un four à gaz un mélange comprenant 28 parties d'aluminium et 72 de platine. En 1901, Brunck, en fondant 6 parties d'aluminium et 1 de platine, obtint un culot qui, traité par l'acide chlorhydrique étendu, laissait des cristaux ayant, d'après lui, la formule $Al^{10}Pt^3$. A peu près à la même époque, Mathews et Campbell obtinrent plusieurs alliages aluminium-platine et pensèrent en avoir isolé la combinaison $AlPt^4$, sans toutefois certifier son existence.

En 1912, Chouriguine [1] reprit ces recherches et prépara un

[1] M. Chouriguine, Sur les alliages du platine avec l'aluminium (*Revue de métallurgie*, novembre 1912, p. 874).

grand nombre d'alliages dont il étudia les différents éléments. Il en résulte les déductions suivantes :

Entre 0 et 10 $^0/_0$ de platine (alliages très riches en aluminium), les alliages de ces deux métaux laissent d'abord déposer pendant leur solidification des cristaux d'aluminium. L'eutectique se dépose à 639° pour 9 $^0/_0$ de platine. L'examen micrographique de ces alliages montre, sur un fond blanc d'aluminium, de petites lamelles d'eutectique contenant des cristaux d'aluminium ainsi que le composé Al^3Pt.

Un peu au-dessous de 10 $^0/_0$ de platine, il se forme une combinaison plus riche en platine, probablement Al^2Pt.

Au-dessus de 10 $^0/_0$ de ce métal, on constate l'apparition de cristallites de Al^3Pt (*fig.* 65) dont la quantité augmente régulièrement jusqu'à 70,4 $^0/_0$ de platine. Ce composé ne s'altère pas à l'air et ne se dissout pas dans les acides ordinaires à froid. Il se présente en jolis cristaux octaédriques et dentritiques de couleur noir violet ; lorsqu'on les examine sous une lumière oblique, ils ont en différents endroits une teinte jaune d'or.

Au delà de 70 $^0/_0$ de platine et après une attaque au perchlorure de fer, l'examen microscopique met en évidence des cristaux caractéristiques d'un nouveau constituant plus riche en platine ; il se présente en longues bandes blanches (*fig.* 66) inattaquables par le perchlorure de fer, tandis que Al^3Pt s'altère sous l'influence de ce réactif. Il apparaît aux environs de 70 $^0/_0$ de platine, puis sa proportion augmente constamment, à un tel point qu'à 80 $^0/_0$ il remplit près de la moitié de la surface polie de l'alliage.

Propriétés. — Les alliages renfermant moins de 10 $^0/_0$ de platine sont de couleur blanche, mous, très malléables ; ils se laissent cependant bien polir et travailler. Les alliages renfermant de 10 $^0/_0$ à 70 $^0/_0$ de platine sont encore blancs, mais leur dureté augmente avec le pourcentage de ce métal ; le maximum de dureté se manifeste dans ceux qui sont voisins du composé Al^3Pt ; ils sont alors cassants et se laissent facilement pulvériser. L'alliage à 70 $^0/_0$ est du reste parfaitement homogène et a pour formule Al^3Pt.

Au delà de 70 $^0/_0$ de platine, les alliages sont nettement colorés en jaune, bien que les métaux constituants soient de couleur

blanche. Le phénomène du changement de coloration apparaît brusquement pour cette teneur en platine et disparaît entièrement aux environs de 80 %, les alliages devenant à nouveau franchement blancs. Ils sont de plus très cassants, fragiles et se décomposent en une poudre cristalline bronzée après avoir bouilli dans l'acide chlorhydrique concentré.

Les alliages renfermant environ 85 à 90 % de platine sont blancs, malléables, inattaquables par les acides sauf par l'eau régale. Une attaque de quinze minutes par ce réactif montre une belle structure rappelant celle dite des figures de Widmanstatten.

Préparation. — Le platine s'allie assez facilement avec l'aluminium comme avec la plupart des métaux. Mais la préparation des alliages de ces deux éléments est assez difficile en raison du grand dégagement de chaleur qui se produit lorsqu'on les fond simultanément. En outre, l'oxydation facile de l'aluminium, qui se recouvre rapidement d'une couche d'alumine, empêche la réaction.

Pour éviter un brusque dégagement de chaleur, qui peut amener la perte d'une partie de l'alliage par projection, le mieux est de fondre d'abord l'aluminium et d'introduire ensuite dans le bain fondu un fil de platine qui s'y dissout lentement en formant l'alliage désiré. L'emploi d'un four à résistance à tube vertical de charbon, qui permet de dépasser facilement la température de fusion du platine, convient très bien à cette préparation.

Les alliages de platine et d'aluminium semblent devoir être surtout réservés à certains travaux de bijouterie, concurremment au platine pur, d'un prix si élevé aujourd'hui. Ils pourraient aussi être avantageusement utilisés pour l'analyse d'un grand nombre de substances chimiques, sous forme de creusets, tubes, capsules, etc., et particulièrement pour les opérations de calcination.

Amalgames d'aluminium. — L'aluminium s'unit très facilement au mercure pour former des amalgames qui, suivant la quantité de mercure absorbée et le procédé d'amalgamation utilisé, possèdent des propriétés différentes. Ces dernières sont telles qu'elles permettent d'obtenir de ces alliages des composés susceptibles d'intéressantes applications industrielles.



Fig. 65. — Alliage aluminium-platine à 70 % d'aluminium et 30 % de platine. — Cristallites du constituant Al^3Pt



Fig. 66. — Alliage aluminium-platine à 20 % d'aluminium et 80 % de platine montrant un constituant spécial (bandes blanches). — Attaque par le perchlorure de fer à 50 %.

Le procédé le plus simple pour amalgamer l'aluminium est de l'immerger dans un bain de mercure. Cependant, pour que le mercure pénètre dans l'aluminium, il est essentiel que celui-ci soit fraîchement décapé, par exemple gratté avec une lame d'acier.

Aluminium activé. — Une plaque d'aluminium immergée pendant quelques minutes dans une solution de bichlorure de mercure (sublimé) s'amalgame légèrement. Suivant l'expression de M. Kohn-Abrest, cet aluminium est « activé », car il possède des propriétés que ne manifeste pas l'aluminium pur, bien que la quantité de mercure absorbée dans ces conditions soit extrêmement faible.



Fig. 67. — Lame d'aluminium recouverte de houppes d'alumine. (D'après F. Robin.)

L'air, l'oxygène et l'acide carbonique secs ne paraissent avoir aucune action sur l'amalgame d'aluminium. Mais la simple présence de l'eau et même de l'humidité entraîne sa décomposition. L'expérience la plus simple que l'on puisse faire à ce sujet et qui le démontre nettement est la suivante :

Une plaque d'aluminium bien décapée est introduite au fond d'une cuvette de porcelaine ; on la charge d'une lourde éprouvette pour la maintenir en place et on la recouvre de 3 à 4 centimètres de mercure. L'amalgame se forme rapidement, se dissout dans le bain de mercure, puis vient flotter à sa surface où il s'oxyde au contact de l'air. Cette oxydation, qui se manifeste d'une façon extrêmement curieuse, donne naissance à une masse ouatée blanche dont l'épaisseur peut atteindre 5 à 7 centimètres en 48 heures. Cette matière est extrêmement légère, car elle pèse environ 1gr,5 au litre. On peut facilement la diviser en fragments parallèlement à la direction de

ses fibres, mais il est impossible de la couper perpendiculairement sans la désagréger complètement. D'après les recherches de M. Roger-Jourdain [1], elle est sans doute constituée par un mélange de carbonate d'alumine et d'un peroxyde, indépendants l'un de l'autre. Elle est assez stable à froid ; elle ne se décompose que très incomplètement et lentement dans le vide à la température ordinaire ; la décomposition est au contraire rapide à 110° et instantanée à 160°. Cette sorte d'alumine, carbonatée et oxygénée, se dissout dans les acides avec effervescence par suite du départ de l'acide carbonique.

Au point de vue pratique, cette substance présente des propriétés qui permettent de l'employer pour le polissage des métaux les plus durs (acier trempé), concurremment à l'alumine calcinée provenant de l'alun ammoniacal. Un kilogramme d'aluminium laminé peut donner environ 3kg,5 de ce produit directement utilisable. On l'obtient généralement (procédé Robin) en plaçant les lames d'aluminium dans du mercure qu'on agite vivement ; puis on les retire et on les expose à l'air humide ; elles se recouvrent de houppes d'alumine (*fig.* 67) qu'il est facile de recueillir. La réaction cesse au bout de cinq ou six heures, mais l'aluminium qui a servi à cette préparation peut être de nouveau utilisé et ainsi jusqu'à disparition complète du métal. Ces faits semblent attribuables à la formation d'un couple entre le mercure, l'air humide et l'aluminium, ce dernier jouant le rôle d'élément électro-positif.

Comme autre application de l'aluminium « activé » par des traces de mercure, il faut citer celle qui provient du fait observé que ce métal détermine facilement la précipitation du tannin de ses solutions et permet ainsi d'obtenir des produits dignes d'applications. En traitant par l'acide chlorhydrique les précipités obtenus, on arrive à des substances ayant toutes les propriétés des extraits tanniques. Elles se présentent avec l'aspect d'une matière pulvérulente jaunâtre, sèche, sans odeur nette et en très grande partie soluble dans l'eau ; elles se colorent en noir violacé par le perchlorure de fer, se fixent sur la poudre de peau, etc.

(1) P. Roger-Jourdain, Sur l'oxydation à l'air de l'amalgame d'aluminium (*Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, 14 février 1910, p. 391, et 13 juin 1910, p. 1602).

Alungallines. — Il en est de même des *alungallines*, nom par lequel M. Kohn-Abrest désigne tous les produits obtenus par l'action des acides en général sur les précipités qui se forment lorsqu'on met l'aluminium activé par le mercure en contact avec les liquides renfermant du tannin ou substances analogues. L'acide sulfurique, plus particulièrement, donne des produits intéressants et méritant ce nom, car ils contiennent tous les constituants du sulfate d'alumine plus ou moins déshydraté et du tannin. Ces alungallines peuvent être employées comme matières tannantes, comme substances servant à la teinture, à la charge des fibres, au mordançage, etc., et aussi pour l'extraction directe du tannin et des principes tannants.

Utilisation industrielle. — Comme autre application de la facile absorption du mercure par l'aluminium, il convient de citer celle qui en a été faite dans plusieurs usines à mercure pour garantir les ouvriers contre les intoxications mercurielles.

L'aluminium absorbe en effet le mercure, non seulement lorsque ce dernier est à son contact immédiat, mais même à l'état d'extrême dilution dans l'air et à la température ordinaire. Cette remarquable propriété constitue un moyen très délicat d'analyse pour déceler la présence du mercure et, au besoin, pour l'empêcher de pénétrer dans les organes respiratoires. L'appareil le plus généralement employé comprend une sorte d'aspirateur que l'air est obligé de traverser avant d'être respiré ; il renferme une masse d'aluminium très finement divisé qui absorbe les vapeurs mercurielles au fur et à mesure qu'elles arrivent à son contact. L'efficacité de ce dispositif est, paraît-il, si complète, que les vapeurs denses produites par le chauffage du mercure ou du chlorure de mercure peuvent être respirées sans inconvénient.

Alliages d'aluminium et de cadmium. — Ces deux métaux ne sont pas miscibles à l'état liquide. D'après Wright, qui a déterminé leur solubilité réciproque dans le voisinage du point de fusion de l'aluminium, le cadmium ne peut dissoudre que jusqu'à 0,22 % seulement d'aluminium, et l'aluminium environ 3,39 % de cadmium.

Ces alliages ont peu d'emplois. On les a cependant parfois utilisés pour souder l'aluminium et pour la confection des électrodes de lampes à vapeur de mercure.

Alliages d'aluminium et d'uranium. — M. Guillet a obtenu des alliages de ces deux métaux en réduisant par voie aluminothermique l'oxyde jaune d'uranium U^2O^3. Il a pu ainsi isoler des culots les constituants Al^3U^2 et Al^3U.

Le composé Al^3U^2 se présente en cristaux d'apparence cubique et d'une grande netteté; Al^3U se présente sous forme de poudre cristalline de densité égale à 5,32 (la densité de l'uranium est de 18,4). Ils sont tous deux facilement attaquables par les acides. Ils ne semblent pas subir d'altération à l'air, mais s'oxydent à chaud. Chauffés vers 450° ou 500°, ils se laissent attaquer par le chlore en donnant d'abord des aiguilles rouges de pentachlorure d'uranium; si l'on continue à chauffer, on n'a plus que du chlorure d'aluminium et du chlorure uraneux. A 300° environ, l'eau recouvre ces cristaux d'une couche superficielle d'oxyde vert d'uranium et d'alumine.

Alliages d'aluminium et de thorium. — Hönigschmid a obtenu un alliage de thorium et d'aluminium de formule Al^3Th en chauffant les deux métaux dans le vide à la température de 1000° environ. On peut encore le préparer en réduisant par l'aluminium l'oxyde de thorium ou le fluorure double de thorium et de potassium.

Cet alliage cristallise sous forme d'aiguilles d'aspect hexagonal. Il a la couleur et l'aspect extérieur de l'aluminium, mais n'est pas attaqué par les solutions alcalines.

Alliages d'aluminium et de cérium. — Le diagramme de ces alliages correspond, d'après Vogel, à quatre composés définis : Ce^2Al, $CeAl$, $CeAl^2$ et $CeAl^4$. Comme la densité du cérium (6,63) est beaucoup plus élevée que celle de l'aluminium (2,56), le mieux, pour les obtenir, est de fondre d'abord l'aluminium ; on ajoute ensuite le cérium par morceaux plus ou moins gros. Tous les alliages de ces deux métaux sont notablement moins pyrophoriques que ceux que forme le cérium avec le fer, l'étain et le plomb.

Alliages d'aluminium et de thallium. — Ces deux métaux sont insolubles réciproquement à l'état liquide. En raison de leur grande différence de densité, ils donnent lieu rapidement à un culot formé de deux couches nettement superposées. Ils n'ont pas d'emploi.

Alliages de l'aluminium avec les métaux alcalins. — Le potassium et l'aluminium n'offrent pas de solubilité appréciable à l'état liquide. Le point de fusion de chacun de ces deux métaux n'est pas non plus modifié par addition de l'autre métal. Après solidification, on observe deux couches nettement séparées et ne contenant que leur propre élément sans traces de l'autre métal.

Alliages de l'aluminium avec les métaux alcalino-terreux. — *Propriétés.* — Les alliages d'aluminium et de calcium possèdent certaines propriétés qui permettent de les utiliser industriellement, principalement quand leur teneur en calcium est élevée. Le calcium forme en effet avec l'hydrogène, l'oxygène et l'azote des combinaisons stables à une température élevée. En métallurgie, il peut ainsi constituer un agent précieux de réduction en absorbant ces gaz des métaux fondus. On a donc tout intérêt à obtenir des alliages riches en calcium.

Jusqu'à 8 % de calcium, ces alliages ont la couleur de l'aluminium. Ils sont un peu plus durs que ce métal. Ils se décomposent dans l'eau chaude en donnant de l'hydrogène. Ils sont stables dans l'eau froide et en présence de l'air.

Entre 20 et 50 % de calcium, ils sont très poreux et difficiles à polir. L'alliage à 20 % est fragile, cassant, de couleur blanc d'argent et offre une structure cristalline très brillante. Il dégage de l'hydrogène dans l'eau froide. Chauffé dans un courant d'azote ou d'hydrogène, il absorbe ces gaz en formant un azoture ou un hydrure de calcium.

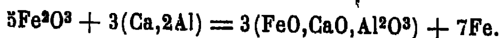
Lorsque la teneur en calcium augmente, les alliages deviennent moins fragiles, mais ils sont de plus en plus instables à l'air et ils agissent sur l'eau avec une plus grande énergie. Il en est de même pour l'absorption des gaz.

Préparation. — Ces alliages sont généralement obtenus par l'électrolyse du chlorure de calcium en présence de l'aluminium. L'appareil comprend un four dans lequel on fond d'abord une certaine quantitité d'aluminium que l'on recouvre de chlorure de calcium également fondu. Le récipient est relié au pôle négatif de la source d'énergie électrique, tandis que le pôle positif communique avec une électrode de charbon plongeant dans le bain de chlorure de calcium. Celui-ci est progressivement décomposé, de sorte que le calcium libéré se rend à la cathode d'aluminium où il donne naissance à l'alliage calcium-aluminium. On peut faire varier le pourcentage des éléments dans l'alliage en faisant durer plus ou moins l'opération électrolytique. Il est du reste facile de donner à celle-ci une marche continue.

L'opération s'effectue de la même façon lorsque, au lieu d'alliage calcium-aluminium, on désire obtenir l'un des alliages baryum-aluminium ou strontium-aluminium, composés qui jouissent de propriétés analogues.

Emplois. — Ces différents alliages sont actuellement concurrencés, notamment pour leur emploi en métallurgie, par les silico-calcium-aluminiums (p. 247) et les ferro-silico-aluminiums (p. 247) dont la conservation est plus facile et le prix beaucoup moins élevé.

On emploie cependant, sous forme de grains, l'alliage calcium-aluminium pour la préparation du fer pur tel que celui utilisé pour la soudure autogène. Ce fer est obtenu par voie aluminothermique d'après la réaction suivante :



$$5Fe^2O^3 + 3(Ca,2Al) = 3(FeO,CaO,Al^2O^3) + 7Fe.$$

L'alliage calcium-aluminium produit un effet thermique beaucoup plus considérable que l'aluminium employé seul. La scorie produite dans ces conditions est en outre beaucoup plus fluide que l'alumine. La réaction ci-dessus suppose que l'alliage renferme 42,5 % de calcium ; dans ce cas, pour une partie d'alliage calcium-aluminium, il se produit 1,4 partie de fer pur liquide.

Alliages d'aluminium et de sélénium. — Le sélénium donne avec l'aluminium un composé de formule Al^2Se^3 dont Fonzes-Diacon

a indiqué le mode de préparation et les propriétés. Le procédé le plus simple pour l'obtenir est d'introduire le mélange des deux éléments dans un creuset où la réaction se produit par inflammation, par exemple au moyen d'un fil de magnésium plongeant en partie dans le mélange. Après refroidissement, on obtient un culot de séléniure d'aluminium pur, bien fondu, à structure fibreuse et de teinte jaune grisâtre. On peut encore obtenir ce composé en enflammant comme précédemment un mélange de séléniate de plomb et d'aluminium ou un mélange de séléniure de mercure et d'aluminium.

Ce corps possède à 15° une densité de 3,43. Les acides chlorhydrique et sulfurique dilués l'attaquent avec énergie. L'hydrogène n'agit pas, même au rouge blanc; mais, à chaud, le chlore le transforme en chlorure d'aluminium et en chlorure de sélénium, tous deux volatils. Grillé dans un courant d'oxyde, il ne s'oxyde que superficiellement.

A froid, il s'altère avec la plus grande facilité au contact de l'air humide et dégage d'une façon constante de l'hydrogène sélénié qu'il est ainsi facile d'obtenir pur.

Alliages d'aluminium et de tellure. — On peut obtenir un alliage de ces deux éléments en jetant des morceaux de tellure dans de l'aluminium fondu. Le tellure-aluminium fondu se sépare facilement de l'aluminium en excès. Ce corps décompose l'eau même à froid, de la même façon que le séléniure d'aluminium, en donnant naissance à de l'hydrogène telluré H^2Te.

Alliages d'aluminium et de phosphore. — Les alliages d'aluminium et de phosphore à teneur élevée en ce dernier élément ne sont pas utilisés industriellement, mais on additionne souvent l'aluminium de 0,4 à 0,7 $^0/_0$ de phosphore en vue d'augmenter sa résistance aux agents atmosphériques.

Sous le nom de *météroïte*, on désigne un alliage contenant environ 0,7 $^0/_0$ de phosphore et qui donne de très bons moulages; sa densité et sa conductibilité sont sensiblement les mêmes que celles de l'aluminium pur. On l'emploie également pour la fabrication des fils de transport de l'énergie électrique.

Le phosphore entre aussi, comme nous le verrons plus loin (chap. VIII), dans la composition de plusieurs alliages complexes d'aluminium ; on l'introduit aussi dans ceux contenant déjà du cuivre et du tungstène (p. 157).

Alliages d'aluminium et de cobalt. — Brunck a signalé le constituant $Al^{13}Co^{3}$ comme résidu d'attaque par l'acide chlorhydrique d'un alliage de cobalt et d'aluminium contenant une partie du premier pour six du second. Gwyer a indiqué les constituants $Al^{5}Co^{2}$ et AlCo. Guillet a obtenu les constituants $Al^{2}Co$, $AlCo^{2}$ (*fig.* 68) et $AlCo^{3}$ (*fig.* 69), extraits de culots d'alliages obtenus par voie alumino-thermique ; en fondant directement le cobalt et l'aluminium, il a pu également obtenir $Al^{6}Co$ (*fig.* 71).



Fig. 68. — Alliage aluminium-cobalt montrant des dendrites de $AlCo^{3}$. Attaque à l'acide azotique. — Gross. : 100 diam. (D'après L. Guillet.)

Ces quatre derniers composés correspondent à ceux de nickel et d'aluminium obtenus par le même savant dans des conditions analogues. Au point de vue métallographique, le rapprochement est du reste évident entre $AlCo^{3}$ et $AlNi^{3}$, entre $AlCo^{2}$ et $AlNi^{2}$ et entre $Al^{6}Co$ et $Al^{6}Ni$. Il en est de même de leurs principaux caractères chimiques. Cependant l'acide nitrique attaque plus facilement les composés de cobalt que ceux de nickel. La densité de $AlCo^{3}$ est de 7,65 à 20° ; celle de $AlCo^{2}$ est de 5,87 et celle de $Al^{2}Co$ de 4,15.

A l'examen microscopique, les alliages renfermant de 80 à 68,5 % de cobalt montrent des polyèdres homogènes, alors que les alliages en renfermant de 90 à 80 % montrent deux constituants après attaque (*fig.* 70) ; cette dernière structure n'est pas modifiée par recuit de 3 heures à 1.260°, alors que l'alliage à 80 %



Fig. 69. — Alliage aluminium-cobalt montrant le constituant $AlCo^{8}$. Attaque par l'acide nitrique étendu. — Gross. : 100 diam.

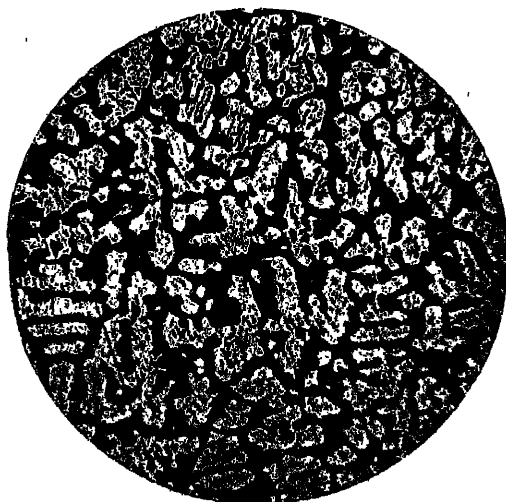


Fig. 70. — Alliage aluminium-cobalt à 12,5 % d'aluminium et 87,5 % de cobalt, montrant deux constituants. Attaque par le perchlorure de fer. — Gross. : 68 diam.

de cobalt non homogène le devient après recuit de 3 heures à 1.275°; il se pourrait cependant que les alliages à 80-90 °/₀ Co devinssent homogènes après chauffage prolongé.

Le magnétisme des alliages contenant de 100 à 68,5 °/₀ de cobalt décroît très vite et devient très peu sensible à 68,5 °/₀ de cobalt, teneur à laquelle correspondrait, d'après Gwyer, le constituant AlCo. A 1.165°, ce constituant réagirait sur le liquide pour former le composé Al^5Co^2. Il se produirait également une réaction entre le liquide et Al^5Co^2 vers 940°, température à laquelle se formerait $Al^{13}Co^3$.

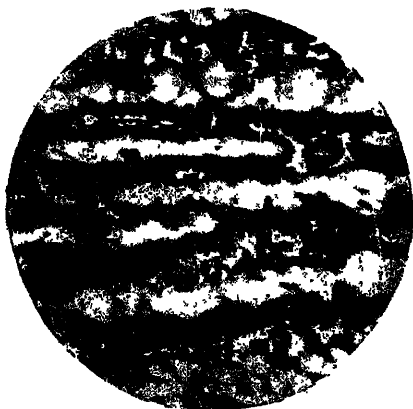


Fig. 71. — Alliage aluminium-cobalt montrant des cristaux de Al^6Co. Attaque à l'acide azotique. — Gross. : 100 diam (D'après L. Guillet)

De même que pour les alliages aluminium-nickel, on observe un petit dégagement de chaleur à 550°, lequel décroît de 20 à 25 °/₀ de cobalt, puis augmente jusqu'à 33 °/₀ de cobalt pour diminuer ensuite entre 33 et 46 °/₀ de cet élément. Il se pourrait qu'on fût en présence de deux effets calorifiques d'origine différente quoique se manifestant à la même température. Ainsi, dans les alliages riches en aluminium, il y aurait une réaction entre cet élément et $Al^{13}Co^3$ amenant la formation d'un composé plus pauvre en cobalt; dans les alliages riches en $Al^{13}Co^3$, il y aurait transformation polymorphe de ce dernier. En tout cas, aucune modification structurale ne correspond à ce dégagement de chaleur qui n'est pas dû non plus à une transformation de l'aluminium.

Le prix des alliages aluminium-cobalt est trop élevé pour qu'ils puissent être utilisés directement dans l'industrie. Ils ont cependant fait l'objet de plusieurs brevets de fabrication et d'emploi.

Une très faible proportion de cobalt rend cependant l'aluminium encore plus réfractaire à l'attaque des agents naturels. Certains alliages de ces deux métaux ont une résistance à la rupture de

30 kilogrammes par millimètre carré et un allongement compris entre 6 et 8 °/₀.

Alliages d'aluminium et de manganèse. — *Constitution.* — Ces alliages (*fig.* 72 à 74) possèdent plusieurs constituants définis et faciles à obtenir. Dès 1860, Michel et Wölher ont préparé des alliages aluminium-manganèse en fondant un mélange composé de deux parties de chlorure de manganèse, six de chlorure de potassium et quatre d'aluminium.



Fig. 72 — Alliage aluminium-manganèse à 10 °/₀ de manganèse, montrant une combinaison des deux métaux. Attaque à la potasse. — Gross. : 200 diam. (D'après L. Guillet.)

Le produit obtenu dans ces conditions, assez impur, renfermait un excès de manganèse dû à la présence d'une certaine quantité de fer; il répondait à la formule Al^3Mn et possédait une teinte gris d'acier.

En projetant par fragments du chlorure de manganèse anhydre dans de l'aluminium fondu, celui-ci jouant le rôle de réducteur, on peut obtenir un alliage contenant 4 °/₀ environ de manganèse; il a une cassure cristalline. Dans cette opération, il y a en même temps production de chlorure d'aluminium qu'il est facile de recueillir dans un appareil à condensation. C'est en utilisant cette réaction que Terreil a obtenu un alliage auquel il attribue la formule $AlMn^3$ et pouvant rayer le verre.

En 1901, Brunck a préparé des cristaux répondant à la formule Al^7Mn^2 en chauffant sous une couche de fondant un mélange comprenant une partie de manganèse pour six d'aluminium. Les cristaux obtenus étaient cependant très impurs, car ils contenaient une assez forte proportion de fer et de silicium.

En 1902, L. Guillet, en faisant l'étude des alliages aluminium-fer

et aluminium-manganèse, put isoler de plusieurs produits aluminothermiques les constituants Al^3Mn et Al^3Mn^2.

M. Arrivaut, reprenant cette étude, a pu signaler, au cours de la préparation de nombreux alliages de manganèse, la combinaison définie $AlMn^2$, très riche en manganèse et qui n'avait point encore été obtenue.

L'alliage Al^2Mn se présente en lamelles très brillantes se dissolvant rapidement dans les acides étendus mais inattaquables par les solutions alcalines. Il est dissous en partie par l'acide acétique étendu à 25 % avec formation d'une liqueur blanchâtre due à la présence de l'acétate d'aluminium.



Fig. 73. — Alliage aluminium-manganèse à 25 % d'aluminium, montrant un peu de solution solide. Attaque à la potasse. — Gross. : 200 diam.

L'alliage AlMn possède à peu près les mêmes caractères, mais les acides l'attaquent avec un peu moins d'énergie ; la potasse est sans action sur lui.

L'alliage Al^3Mn^2 se présente sous forme de cristaux lamellaires extrêmement brillants ou à l'état de poudre métallique gris d'acier. Il est attaquable par les acides étendus et les solutions alcalines ; il se délite assez facilement à l'air. Sa densité est de 3,92.

L'alliage Al^3Mn se présente sous forme de lamelles d'un très bel aspect et s'isolant aisément des culots qui le renferment. D'après Guillet, il ne se laisse attaquer, ni par la potasse à 3 %, ni par l'acide chlorhydrique à 5 % et ne se délite pas à l'air. Sa densité est de 3,41.

L'alliage Al^4Mn, qui est la moins riche en manganèse, cristallise en longues aiguilles ; celles-ci sont souvent disposées en houppes soyeuses à la surface de séparation des éléments de l'alliage et paraissent principalement se former lorsqu'on chauffe du manganèse

avec de l'aluminium fondu. Les alcalis et l'acide chlorhydrique sont sans action sur lui.

Propriétés. — Nous donnons ci-dessous, d'après L. Guillet, le point de fusion des alliages aluminium-manganèse à différentes teneurs en ces éléments :

Mn 0/0	POINT DE FUSION	Mn 0/0	POINT DE FUSION
2	625°	55	910°
5	620	60	1.040
10	600	65	1.160
20	630	70	1.175
30	650	80	1.220
40	675	90	1.260
50	720	95	1.225

D'une façon générale, ces chiffres, qui représentent le point de fusion des alliages aluminium-manganèse à la mise au creuset, montrent qu'il y a progression assez régulière de la température de fusion avec le pourcentage de manganèse.

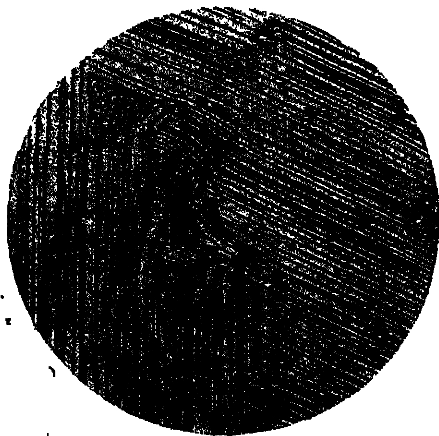


Fig. 74. — Alliage aluminium-manganèse à 65 0/0 d'aluminium, montrant une solution solide. Attaque à la potasse. — Gross. : 200 diam. (D'après L. Guillet.)

Au point de vue mécanique, les alliages aluminium-manganèse ont une résistance à la rupture supérieure à celle de l'aluminium. Au delà de 10 0/0 de manganèse, ils deviennent durs et fragiles. De plus, entre 30 et 80 0/0 d'aluminium, ils s'altèrent rapidement au contact de l'air et tombent en poussière ; les alliages riches en aluminium renferment en effet surtout le constituant Al^2Mn^3 dont la forme cristalline peut se modifier presque spontanément.

Nous donnons ci-dessous les résultats d'essais mécaniques sur plusieurs alliages riches en aluminium :

Al %	Mn %	RÉSISTANCE À LA RUPTURE	ALLONGEMENT
99,02	0	10^{kg},2	7 %
99,51	0,42	11 ,5	6
99,03	0,84	13 ,2	6
98,21	1,65	14 ,6	6
97,07	2,73	15 ,3	5

Au point de vue chimique et en outre des particularités déjà signalées pour chaque combinaison, on constate que les alliages à basse teneur en manganèse résistent mieux à l'eau ordinaire et à l'eau de mer que les autres alliages d'aluminium. Cette propriété permettrait de les utiliser avec profit dans la construction des bâtiments marins.

Préparation. — Ces alliages se préparent généralement par simple union de leurs éléments, aluminium et manganèse, ce dernier devant être d'origine aluminothermique pour les alliages purs. Ceux à 40 ou 50 % de manganèse sont aussi obtenus directement par l'aluminothermie. On utilise dans ce but de l'aluminium en rognures que l'on place au fond du creuset de fusion et on le recouvre d'un mélange d'oxyde salin de manganèse et d'aluminium en poudre.

On a alors la réaction suivante :



$$\underset{\text{(Rognures)}}{27Al} + 3Mn^3O^4 + \underset{\text{(Poudre)}}{8Al} = 9MnAl^3 + 4Al^2O^3.$$

On a aussi préparé ces alliages au four électrique par le procédé Langley, qui consiste à réduire en même temps la cryolithe et l'oxyde de manganèse. Ce procédé est économique, mais il ne donne pas des alliages très purs.

Emplois. — Les alliages peu riches en manganèse (1 à 3 %) sont utilisés dans l'industrie automobile et dans la carrosserie. Ils sont constitués par une solution aluminium-manganèse. Leurs

applications se répandront certainement le jour où ils seront mieux connus; ils ont pour principaux concurrents à l'heure actuelle certains bronzes et laitons complexes au manganèse et notamment l'alliage manganèse-cuivre-aluminium qui a de nombreux usages.

Alliages d'aluminium et de chrome. — *Constitution.* — Wöhler et Michel ont obtenu un alliage répondant sensiblement à la formule $AlCr^4$ en réduisant le chlorure violet de chrome par l'aluminium. Guillet a préparé par l'aluminothermie des alliages à teneurs variées en chrome et aluminium, dont il a pu extraire les deux combinaisons définies AlCr et $AlCr^4$. Ces deux composés se présentent sous forme de poudres de couleur gris argent; ils sont extrêmement brillants. Leurs densités, à la température de 20° environ, sont les suivantes :

AlCr	4,93
$AlCr^4$	6,75

L'oxygène ne les attaque que vers 325°. L'eau est sans action. Les acides sulfurique et chlorhydrique ainsi que l'eau régale les dissolvent lentement à la température ordinaire et assez rapidement à l'ébullition. Le chlore n'agit qu'à chaud. Les alcalis ne les attaquent pas sensiblement, même à l'ébullition.

Propriétés. — Les culots métalliques qui permettent d'isoler ces alliages sont très nets ; ils se séparent aisément du corindon qui surnage mais ne présentent que rarement des cristallisations franches. De plus, il y a toujours des pertes notables de chrome dues à l'entraînement de ce métal par l'alumine fondue. Ces culots sont durs et cassants. Ils permettent d'obtenir des alliages à teneurs élevées en l'un ou l'autre métal par réaction de l'aluminium sur l'oxyde de chrome en poudre.

Au point de vue des propriétés mécaniques, encore peu étudiées, de ces alliages, on a constaté que, pour avoir un alliage supportant le martelage et le laminage, il ne faut pas que le chrome dépasse 3 °/₀ dans le produit final. L'alliage à 7 °/₀ est cassant et sa structure finement cristalline; l'alliage à 13 °/₀ est entièrement

cristallisé et se pulvérise facilement au mortier. Le chrome durcit fortement l'aluminium et la dureté ainsi acquise, d'après Richards, se conserverait même par le recuit. L'alliage le plus recommandable à ce point de vue semble être celui de 2,3 % de chrome.

Préparation. — En outre du procédé aluminothermique dont il vient d'être question, on a proposé et mis en pratique plusieurs méthodes de préparation de ces alliages. Ainsi, en projetant du sesquichlorure de chrome dans l'aluminium fondu, il se produit, par réduction, du chrome métallique qui peut s'allier à l'aluminium et former un alliage de ces deux métaux; la réaction est très violente ; elle permet de préparer des alliages renfermant une proportion quelconque des deux éléments.

Le procédé Chaplet et Bonnet, qui repose sur l'électrolyse de sels de chrome et d'aluminium mélangés, ne paraît pas pratique. Il donne un mélange plus ou moins spongieux des deux métaux qu'on est obligé ensuite de refondre pour avoir un alliage homogène et résistant.

L'emploi du four électrique permet, au contraire, d'obtenir ces alliages à bon compte. On commence par introduire dans l'appareil une certaine quantité d'aluminium, ou un mélange de chrome et d'aluminium juste nécessaire pour amorcer l'arc, puis on baisse l'électrode supérieure. Dès que la masse métallique est fondue, on charge progressivement le four avec un mélange d'alumine et de chromite (ou de sesquioxyde de chrome pour les alliages purs). L'alliage est recueilli à l'état liquide dans une lingotière, grâce à un trou de coulée ménagé à la partie inférieure du four. Pendant l'opération, ce trou de coulée est obstrué par un tampon d'argile.

Emplois. — Les alliages d'aluminium et de chrome, encore peu employés, sont susceptibles de multiples usages : pièces mécaniques devant subir des frottements, objets divers d'appareillage, pièces d'outillage, constructions automobiles. Certains aciers renferment aussi une faible proportion de ces deux éléments. On emploie également les alliages complexes aluminium-chrome-cuivre et certains bronzes ternaires et quaternaires à teneurs variées de ces

deux éléments pour la fabrication des pièces de petite mécanique et d'appareillage.

Alliages d'aluminium et de tungstène. — *Constitution et propriétés.* — On connaît actuellement trois combinaisons définies d'aluminium et de tungstène : $AlTu^2$, Al^3Tu et Al^4Tu.

L'alliage $AlTu^2$ peut être obtenu aisément par voie aluminothermique. Il se présente en cristaux brillants ou sous forme de poussière cristalline noirâtre ; il est inattaquable par les acides et par l'eau régale. Sa densité est de 12,75.

L'alliage Al^3Tu se prépare de la même façon. Il se laisse également peu attaquer par les acides et semble constitué par des cristaux prismatiques, cannelés et d'apparence quadratique. Sa densité est de 6,31.

L'alliage Al^4Tu (*fig.* 75) est celui qui a donné lieu jusqu'ici au plus grand nombre de travaux. Wöhler et Michel l'ont obtenu en fondant à la température du rouge un mélange comprenant les substances suivantes :

Anhydride tungstique..................	15	parties
Cryolithe.............................	30	—
Aluminium	15	—
Chlorure de sodium....................	30	—

M. Guillet l'a également préparé à l'état de cristaux lamellaires pouvant atteindre de grandes dimensions. Il est facilement attaquable par l'acide nitrique et les acides concentrés. Sa densité est de 5,56.

Ces trois combinaisons définies ne sont pas attaquées par l'oxygène à la température ordinaire ni même au-dessous du rouge. Mais au rouge naissant, il se forme rapidement de l'acide tungstique, de l'oxyde bleu de tungstène et de l'alumine. L'eau bouillante les attaque légèrement : les cristaux se recouvrent d'une mince couche d'oxydes qui les protège contre une oxydation plus avancée. La potasse concentrée ou étendue n'agit pas à froid, mais il se produit à chaud une attaque d'autant plus rapide que les alliages contiennent plus d'aluminium. Le chlore n'agit pas à la température ordinaire ; à 300°, il donne naissance à du chlorure

d'aluminium et à de l'hexachlorure de tungstène, qui tous deux se volatilisent.

Les alliages aluminium-tungstène sont d'autant plus denses qu'ils renferment plus de tungstène, ce métal ayant un poids spécifique très élevé (17,5) comparativement à celui de l'aluminium.

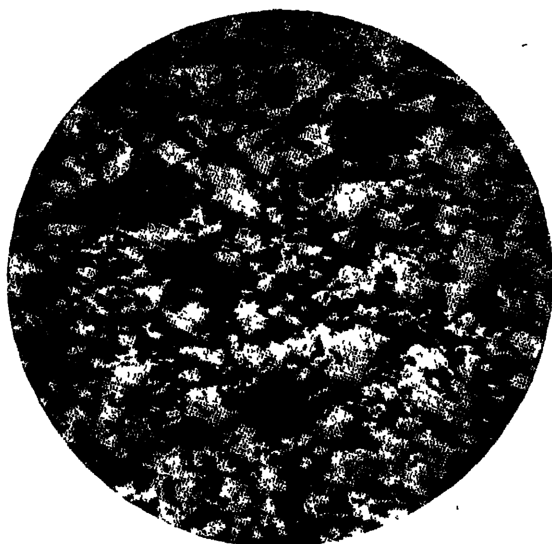


Fig. 75. — Alliage d'aluminium et de tungstène, montrant la combinaison Al^4Tu. Attaque par la teinture d'iode diluée — Gross. : 100 diam.

Les propriétés mécaniques varient avec le traitement. Nous donnons ci-dessous la valeur de la résistance à la rupture et de l'allongement pour un alliage titrant 50 °/₀ de tungstène :

	Résistance à la rupture.	Allongement. °/₀
Alliage coulé	15kg,5	1,5
— recuit	18	10
— laminé et recuit	25	4

Préparation et emplois. — En outre des modes de préparation indiqués plus haut, on peut obtenir ces alliages en projetant de l'aluminium fondu sur de l'acide tungstique, ou par voies aluminothermique et électrothermique combinées.

On ne les a encore que peu utilisés industriellement. Par contre, le *wolframinium* (p. 158), le *partinium* (p. 261) et d'autres alliages, dans lesquels entrent le tungstène, l'aluminium, le cuivre et d'autres éléments en petite quantité, ont reçu d'importantes applications, grâce à leur grande résistance mécanique et à leur dureté.

Alliages d'aluminium et de vanadium. — *Constitution et préparation.* — Moissan a obtenu un alliage non défini d'aluminium et de vanadium en chauffant au fond d'un creuset de terre une certaine quantité d'aluminium et en la maintenant fondue pendant un certain temps, puis en projetant à la surface du bain un mélange d'acide vanadique et de limaille d'aluminium. Ce dernier métal agit comme réducteur ; il se produit une vive effervescence et, si l'on agite la masse, on obtient un alliage de faible dureté, très malléable, se laissant limer facilement et empâtant même l'outil. Il contient environ 2,5 $^0/_0$ de vanadium.

M. Matignon a obtenu la combinaison AlVa en traitant certains alliages de ces deux métaux par l'acide chlorhydrique étendu. Elle se présente en grandes lamelles très brillantes et bien cristallisées, rappelant tout à fait l'oligiste écailleux ; elle répond à 67,8 $^0/_0$ environ de vanadium et 32,2 $^0/_0$ d'aluminium, d'après les analyses de l'auteur. La facilité relative d'union de ces deux métaux explique pourquoi il faut rejeter l'emploi des récipients argileux dans la préparation du vanadium et pourquoi aussi ce métal a pu difficilement être obtenu jusqu'ici exempt de silicium. Ce dernier forme aisément avec l'aluminium et le vanadium un silico-aluminure, dont il sera question plus loin (p. 245).

Propriétés et emplois. — L'addition, en proportions déterminées, de vanadium à l'aluminium paraît devoir réserver à ces alliages des applications intéressantes ; elle réalise, en effet, la solution du problème, fort important à l'heure actuelle, de la production d'un métal ou d'un alliage possédant à la fois une grande légèreté et une grande résistance mécanique. Additionné de 3 $^0/_0$ de vanadium, l'aluminium présente en outre la particularité d'être très sonore ; il pourrait ainsi être introduit d'une façon intéressante dans la fabrication des instruments de musique.

Alliages d'aluminium et de titane. — M. Guillet a obtenu un certain nombre d'alliages de titane et d'aluminium en réduisant l'acide titanique par l'aluminium en grains, par voie aluminothermique. On n'arrive à des résultats intéressants que si l'on a soin de porter au préalable le mélange à la température de 600° et si, de plus, aussitôt après l'inflammation, on dirige un jet d'oxygène sur sa surface.

Les culots obtenus dans ces conditions contiennent toujours une assez forte proportion d'oxyde et d'azote de titane. Il semble y avoir deux combinaisons définies : Al^3Ti^2 et Al^4Ti. Ces composés ne sont attaqués par l'eau et l'oxygène qu'à une température élevée. L'acide chlorhydrique et l'eau régale les dissolvent facilement. Le chlore les attaque rapidement au rouge.

Manchot et Richter ont obtenu des alliages de ces deux métaux en fondant pendant un quart d'heure un mélange comprenant 24 parties de fluotitanate de potassium et 45,5 d'aluminium. On enlève l'excès d'aluminium en chauffant doucement le produit obtenu avec une solution normale de soude et en ayant soin d'empêcher l'accès de l'air. On obtient ainsi un corps répondant à la formule Al^3Ti et se présentant sous forme de lamelles carrées, argentines, brillantes, fragiles, de densité 5,5. Il se dissout facilement dans les alcalis concentrés et les acides avec dégagement d'hydrogène. La solution dans l'acide sulfurique dilué, chaud et à l'abri de l'air donne le sulfate correspondant à l'oxyde Ti^2O^3.

On a préparé et utilisé industriellement quelques alliages d'aluminium et de titane, notamment celui comprenant 69,6 $^0/_0$ d'aluminium et 30,4 $^0/_0$ de titane, mais leur grande fragilité les rend impropres à une application immédiate quelconque.

Alliages d'aluminium et de molybdène. — Les premiers alliages d'aluminium et de molybdène sont dus à Wöhler qui put isoler une combinaison définie répondant à la formule Al^3Mo. Guillet a aussi obtenu, dans ces dernières années, un certain nombre d'alliages de ces deux métaux et dont a il extrait les constituants $AlMo^4$, AlMo et Al^7Mo.

L'alliage Al^3Mo se présente sous forme de cristaux lamellaires, doués d'une très grande dureté et possédant, à 20° environ, une

densité égale à 4,45. On peut le préparer en faisant agir l'aluminium sur l'acide molybdique dans la proportion suivante :

Acide molybdique, MoO^3	15,5
Aluminium	14,5

On obtient ainsi un culot formé uniquement d'un agglomérat de magnifiques cristaux contenant 47,54 % de molybdène et 53,23 % d'aluminium, c'est-à-dire répondant bien à la formule Al^3Mo.

L'alliage $AlMo^4$ se présente sous forme de poudre. Le culot qui le fournit possède une cassure très nette, couleur gris d'acier. Sa densité est de 8,10. L'acide chlorhydrique étendu ne l'attaque pas.

L'alliage AlMo se présente en cristaux cannelés d'apparence quadratique, comme le composé correspondant AlTu des alliages aluminium-tungstène. Sa densité est de 5,34. Il contient 77,8 % de molybdène et 23,15 % d'aluminium.

L'alliage Al^7Mo se présente en cristaux aciculaires très nets. Sa densité est de 3,52. Il contient 33,25 % de molybdène et 66,57 % d'aluminium.

A la température ordinaire, ces différents alliages ne sont pas attaqués par l'oxygène, à l'exception de Al^7Mo qui se recouvre d'une légère couche d'alumine. A une température suffisamment élevée, ils donnent, par décomposition, de l'acide molybdique qui se volatilise et de l'oxyde bleu de molybdène qui recouvre les cristaux et forme après refroidissement une couche bleue sur l'alliage. Le composé $AlMo^4$ est celui qui s'oxyde le plus facilement dans ces conditions.

L'eau bouillante ne paraît avoir aucune action sur ces alliages, mais vers 350°, il se forme des oxydes de molybdène et de l'alumine. De plus, les cristaux se recouvrent d'oxyde bleu et de points blanchâtres.

Les acides n'attaquent que lentement ces composés. Cependant, à chaud, l'acide chlorhydrique décompose rapidement Al^3Mo et Al^7Mo. L'acide nitrique concentré et froid exerce sur AlMo et Al^3Mo une action assez lente ; la liqueur prend d'abord une teinte brun clair, puis devient rosée après plusieurs heures d'attaque. Si l'on fait bouillir, la teinte disparaît et la liqueur redevient incolore. Avec ce même acide, étendu de son volume d'eau, il se forme un

dépôt brun d'aspect cristallin et constitué par du bioxyde de molybdène

Le chlore n'agit pas à froid sur ces alliages, mais vers 300° il se forme rapidement du chlorure de molybdène et du chlorure d'aluminium.

La plupart des culots obtenus en réduisant l'acide molybdique par l'aluminium deviennent très friables au bout de fort peu de temps. Abandonnés pendant quelques jours au contact de l'air, ils se transforment en une poudre impalpable. D'après L. Guillet, ce phénomène proviendrait d'un changement allotropique et non d'une oxydation, étant donné qu'il ne paraît y avoir ni changement physique ni augmentation de poids de la substance pendant cette transformation.

CHAPITRE VIII

ALLIAGES DIVERS D'ALUMINIUM

I. — Alliages d'aluminium et de silicium.

Constitution. — Un grand nombre d'auteurs se sont occupés des propriétés et de la préparation des alliages de silicium et d'aluminium. Bien que des savants autorisés, tels que Wöhler, Sainte-Claire Deville, Winkler aient cru à la possibilité de combinaisons entre ces deux éléments, il n'a pas encore été obtenu, tant au laboratoire que dans l'industrie, de siliciure d'aluminium. Vigouroux ne croit même pas à l'existence possible d'un tel composé et admet que, dans tous les cas, il y a simplement dissolution du silicium dans l'aluminium. Frilley pense cependant que dans certaines conditions favorables, par exemple en mettant en présence du silicium et de l'aluminium à l'état naissant, on peut arriver à obtenir du siliciure d'aluminium.

Quoi qu'il en soit, l'analyse chimique des produits obtenus, leur étude micrographique et l'examen de leur densité montrent qu'on est seulement en présence de corps dissous ou se saturant mutuellement.

Si l'on attaque, en effet, un culot d'alliage aluminium-silicium (obtenu par exemple en faisant agir l'aluminium sur un silicate) par l'acide chlorhydrique, on obtient du chlorure d'aluminium, de l'hydrogène et du silicium cristallisé. Il est évident que s'il existait du siliciure d'aluminium dans l'alliage, le silicium de ce composé apparaîtrait après attaque, soit combiné, soit libre et, dans ce dernier cas, à l'état amorphe. Les quantités de siliciure d'hydrogène

ALLIAGES ALUMINIUM-SILICIUM

(Gross. : 75 diamètres.)

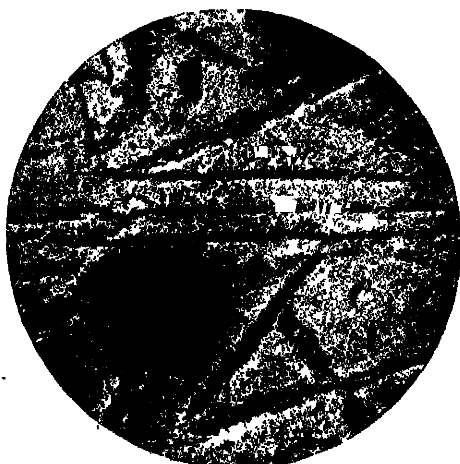


Fig. 76. — Alliage aluminium-silicium à 35 % de silicium. Attaque à l'acide chlorhydrique. (Cristaux de silicium englobés par l'aluminium.)

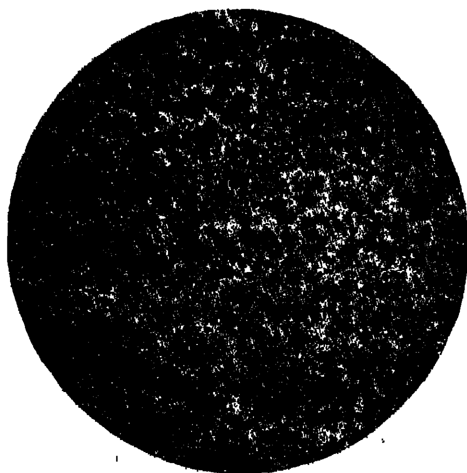


Fig. 77. — Alliage aluminium-silicium à 5 % de silicium. Attaque à l'acide chlorhydrique. (Les plages blanches représentent l'aluminium.)

ou de silice, quand elles existent, sont toujours très faibles, nulles la plupart du temps, et c'est aux impuretés de l'aluminium (fer notamment) qu'il faut attribuer leur présence (¹).

L'étude micrographique de ces alliages montre qu'il en est bien ainsi. En général, elle laisse voir des cristaux de silicium englobés par l'aluminium. L'alliage à 35 °/₀ de silicium (*fig.* 76) montre, sur un fond blanc grisâtre, de larges traits brillants et foncés, dirigés dans tous les sens ; ce sont des cristaux de silicium se présentant suivant leur tranche. Les quelques grosses taches noires que montre la figure sont dues à des cavités qui creusaient la surface polie de l'alliage. Le fond de la pâte, d'aspect granité, est constitué par la juxtaposition de cristallites de silicium et d'aluminium. Il en est à peu près de même de l'alliage à 25,35 °/₀ de silicium, bien que les cristaux y soient plus clairsemés. L'alliage à 14,82 °/₀ de silicium ne renferme plus de silicium librement cristallisé. L'aluminium s'est d'abord déposé le premier sous forme d'arborescences, prenant une teinte blanchâtre après une légère attaque à l'acide chlorhydrique. L'alliage à 5 °/₀ de silicium (*fig.* 77) montre encore l'aluminium occupant la plus grande partie de la surface métallique (plages blanches). Les vides sont remplis d'eutectique qui n'est d'ailleurs dans l'alliage qu'en petite quantité.

La mesure de la densité d'alliages très variés de silicium-aluminium vient encore confirmer ce qui précède, c'est-à-dire l'inexistence d'une combinaison auxiliaire quelconque d'aluminium et de silicium dans les alliages obtenus jusqu'ici. La courbe représentant la variation de cette densité est en effet très régulière, sans rupture brusque en aucun point ni particularités laissant supposer la formation, pour un alliage de composition déterminée, d'un constituant défini. Nous donnons plus loin les chiffres représentant la densité des différents alliages aluminium-silicium entre 10 et 96,5 °/₀ de silicium.

Propriétés physiques. — La plupart de ces alliages renferment, comme impureté principale, du fer qui doit sans doute y exister à

(¹) C'est à la faveur de ces impuretés que prennent naissance certains siliciures doubles ou *silico-aluminures* (alliages ternaires silicium-fer-aluminium, silicium-manganèse-aluminium, etc.) dont il sera question plus loin. — V. p. 245 et suiv.

l'état de siliciure $Si^3 Fe$. Entre 0 et 10 °/₀ de silicium, ils possèdent une couleur un peu plus grise que celle de l'aluminium, sont plus résistants et se travaillent bien. Entre 10 et 20 °/₀, l'alliage est brillant, cristallisé, plus fusible que l'aluminium pur; il peut se forger à chaud jusqu'à 15 °/₀; au delà, l'opération présente beaucoup de difficultés, le palier de travail étant extrêmement étroit. Entre 20 et 38 °/₀, l'alliage présente de grandes facettes cristallines; il s'écrase facilement; sa couleur est bleutée, un peu terne. A 38 °/₀ apparaissent les cristaux de silicium; l'alliage s'écrase difficilement. Entre 40 et 55 °/₀, il est composé d'un magma de cristaux enchevêtrés. A partir de 55 °/₀ jusqu'à l'extrême limite de pureté, il a l'aspect bleuté du silicium fondu.

La densité, peu variable avec le pourcentage en silicium, est représentée par les chiffres ci-dessous :

SILICIUM °/₀	DENSITÉ	SILICIUM °/₀	DENSITÉ
10	2,52	57	2,42
20	2,50	64	2,40
30	2,45	71	2,37
38	2,44	85,2	2,35
47,5	2,44	96,5	2,37

Comme on le voit, la densité reste voisine de celle de l'aluminium.

Résistance chimique. — Les alliages renfermant seulement de 0 à 10 °/₀ de silicium présentent une résistance à l'attaque des réactifs usuels semblable à celle de l'aluminium pur tant qu'ils ne contiennent, comme impureté, qu'une très faible quantité de fer. Tous les alliages sont complètement solubles dans les alcalis et carbonates alcalins fondus ainsi que dans les solutions alcalines concentrées et chaudes. L'acide nitrique, même à chaud, ne les attaque qu'avec une extrême lenteur. L'acide sulfurique les attaque légèrement et lentement. L'acide chlorhydrique agit violemment avec formation d'un dépôt dont la couleur varie suivant le mode de préparation; les alliages formés par la réunion des deux éléments laissent un dépôt noir ou brun foncé, presque

totalement insoluble dans l'acide fluorhydrique. Les alliages commerciaux, formés par décomposition de la silice en présence de l'aluminium, laissent un dépôt qui varie du noir au jaune clair et constitué par un mélange, soluble dans l'acide fluorhydrique, de silice, de silicium graphitique et d'un peu d'alumine. Le mélange d'acide fluorhydrique et d'acide nitrique dissout complètement tous les alliages aluminium-silicium avec une très grande violence.

Propriétés mécaniques. — Les chiffres les plus élevés de résistance sont obtenus avec les alliages dans lesquels la proportion de fer est très faible. Nous donnons ci-dessous les résultats obtenus pour des alliages à 3 % et 10 % de silicium :

Si %	TRAITEMENT	RÉSISTANCE A LA RUPTURE	ALLONGEMENT
3	Écroui	25kg,1	2 %
	Recuit	11 ,0	29
10	Écroui	22 ,7	2
	Recuit	15 ,2	18

L'influence du recuit semble très importante pour les allongements. Au delà de 10 % de silicium, la résistance diminue à mesure que la teneur de celui-ci augmente : les alliages deviennent cristallins et sont impropres à toute utilisation directe.

Préparation. — Plusieurs procédés ont été proposés et mis en pratique pour la préparation des alliages aluminium-silicium. Rappelons d'abord que Frilley (1911), en cherchant à obtenir du silicium électrolytique par la méthode de Sainte-Claire Deville (électrolyse d'un bain de fluorure double de sodium et de potassium fondu, dans lequel on fait dissoudre peu à peu de la silice) a pu préparer une petite quantité d'alliage aluminium-silicium en ajoutant simplement de la cryolithe (fluorure double d'aluminium et de sodium) dans le bain ; mais cette réduction lui paraît purement accidentelle (1).

(1) R. Frilley, Recherches sur quelques alliages métalliques siliciés (*Revue de Métallurgie*, Juillet 1911, n° 7, p. 518).

Par l'électrolyse d'un bain comprenant 30 parties de chlorure de sodium, 30 de cryolithe, 5 d'alumine et 5 de silice, A. Minet a pu obtenir aussi un alliage d'aluminium et de silicium. Le bain était contenu dans un creuset de fonte garni intérieurement de charbon et servant de cathode ; les anodes étaient constituées par des plaques de charbon aggloméré. D'après Frilley, cette réaction, certainement possible comme amorçage de début, est pratiquement impossible même pendant un temps très court, à moins d'ajouter des quantités de fluorures absolument inadmissibles pour les rendements obtenus.

La réduction de la silice par l'aluminium au four électrique permet au contraire d'obtenir rapidement de grandes quantités d'alliage riche en silicium. C'est en somme de l'aluminothermie au four électrique, l'arc servant de cartouche d'allumage pour le mélange ; mais, tandis que la réduction par voie aluminothermique directe est assez difficile et exige des matières en poudre fine, parfaitement sèches et intimement mélangées, la préparation au four électrique est des plus simples ; elle permet d'employer du sable pur quelconque et des copeaux d'aluminium. Le seul inconvénient est l'introduction d'un peu de fer dans l'alliage.

Frilley est arrivé par ce procédé à obtenir des alliages contenant de 30 à 96 % de silicium. Pour les teneurs inférieures, le mieux est d'effectuer la fusion, au creuset, d'un mélange d'aluminium pur et d'alliage à 30 %. Au delà de 30 % de silicium, teneur pour laquelle l'alliage fond à 900° environ, la fusion au creuset est difficile. Il en est de même de la fusion au four électrique à arc d'un mélange d'aluminium et d'un alliage silicié d'aluminium ; elle est très difficile même sous une couche de cryolithe fondue ; la réaction est extrêmement violente, presque explosive et ne peut jamais s'effectuer sans une grosse perte de matières.

Pour l'obtention d'alliages ne renfermant pas plus de 5 % de silicium, on peut se contenter d'introduire de la silice dans un four à aluminium ordinaire (procédé Héroult, p. 16). La silice est réduite en même temps que l'alumine et les deux éléments mis en liberté forment l'alliage désiré. Si l'on augmentait outre mesure la quantité de silice ajoutée dans le four, le bain s'épaissirait, la température s'élèverait et l'appareil fonctionnerait dans de très mauvaises conditions.

L'union directe de l'aluminium et du silicium fournit également des alliages bien fondus. Si l'on projette du silicium sur de l'aluminium fondu en ayant soin de fortement agiter pour renouveler les contacts et de donner un bon coup de feu, on obtient après refroidissement un alliage homogène. Le silicium se dissout très bien dans l'aluminium malgré la petite pellicule de silice qui se forme à la surface des grains lorsqu'ils tombent sur le métal en fusion ; l'aluminium réduit en effet la silice et met à nu le silicium, de sorte que le mélange des deux éléments s'effectue dans de bonnes conditions.

A l'aide d'un courant de 350 ampères sous 50 volts environ, la fusion s'opère rapidement. Des courants trop intenses volatilisent en partie l'aluminium et occasionnent ainsi des pertes.

En projetant sur un bain d'aluminium fondu un mélange de silice et de poudre d'aluminium, on arrive à d'assez bons résultats, mais il est difficile de dépasser ainsi des teneurs en silicium supérieures à 3 °/₀.

La réduction des silicates, opérée dans de bonnes conditions, permet également d'obtenir des alliages de silicium et d'aluminium. M. Kohn-Abrest a en effet montré que la chauffe prolongée d'une masse d'aluminium dans une nacelle de porcelaine donne naissance à un alliage d'aluminium et de silicium ; le produit obtenu apparaît en amas cristallisés. La nacelle, qui acquiert ainsi de beaux reflets irisés, perd une grande partie de son poids.

M. Kohn-Abrest a obtenu en outre des alliages d'aluminium et de silicium en chauffant dans le vide, vers 1100°, l'aluminium dans des vapeurs de silicium.

La réduction du fluosilicate de potassium par l'aluminium donne un alliage qui, fondu avec un poids calculé à l'avance d'aluminium pur, permet d'obtenir des alliages aluminium-silicium avec une teneur quelconque de ces éléments. MM. Vigouroux et Arrivaut ont ainsi préparé des alliages renfermant jusqu'à 70 °/₀ de silicium ; celui-ci se dissout en partie dans l'aluminium et, d'autre part, se mélange mécaniquement avec ce métal, un peu comme le graphite dans la fonte.

Plusieurs usines électrométallurgiques fabriquent spécialement du silico-aluminium en réduisant par le charbon la bauxite sili-

ceuse, additionnée ou non de quartzite. Il n'est pas question ici d'obtenir comme produit principal un laitier de corindon ou d'alumine et la conduite de la fabrication est alors analogue à celle des ferro-siliciums à haute teneur. L'allure du four est extrêmement chaude : l'alliage est produit et accumulé sur la sole à une température bien supérieure à la limite de stabilité du carbure d'aluminium, de sorte que les alliages résistent, sans se déliter, à l'action de l'air. Ces produits constituent des désoxydants remarquables, fort appréciés par la sidérurgie.

On a enfin proposé la réduction du silicate de magnésium par le magnésium en présence de l'aluminium, d'après la réaction suivante :



$$3SiO^3Mg + 6Mg + nAl = 9MgO + [2Al, 6Si + (n - 4) Al].$$

L'aluminium doit être en excès.

Emplois. — Les alliages aluminium-silicium n'ont encore que des emplois très limités par suite du peu de connaissances qu'on possède sur leurs propriétés mécaniques et métallurgiques. Ils paraissent cependant aptes à modifier d'une façon heureuse, et par simple incorporation, les qualités de certains aciers, bronzes et laitons. On les a proposés en outre pour la fabrication d'alliages légers et pour l'obtention rapide et facile du silicium riche à 99 %. Il suffit en effet de traiter l'alliage à 96 % par l'acide chlorhydrique bouillant et par l'acide fluorhydrique pour enlever l'excès d'aluminium et la silice entraînés; on a ainsi des quantités considérables et à bon compte de silicium beaucoup plus facilement que par les anciennes méthodes.

Dans la métallurgie, les alliages aluminium-silicium sont concurrencés par les silico-calcium-aluminium, les ferro-silico-aluminium et les silico-ferro-manganèse dont la préparation est beaucoup plus facile et moins coûteuse.

Analyse. — Pour l'analyse de ces alliages, M. Frilley a proposé la méthode suivante :

L'alliage est attaqué par l'acide chlorhydrique. On évapore à sec, on reprend par l'acide chlorhydrique et on filtre : le filtrat renferme l'aluminium et le fer pouvant se trouver comme impureté dans

l'alliage; on précipite par l'ammoniaque et on pèse, ce qui donne le poids total d'alumine et d'oxyde de fer; on reprend par une fusion au bisulfate de potasse et on dose le *fer* par le permanganate de potasse.

Le résidu demeuré sur le filtre contient de la silice et du silicium graphitique; on calcine et on pèse. On reprend par l'acide fluorhydrique; la perte de poids donne la *silice*. Ce nouveau résidu est formé de *silicium* graphitique que l'on dissout dans un mélange d'acide nitrique et d'acide fluorhydrique; on évapore et on pèse. Le résidu final représente l'insoluble de l'alliage, formé d'une petite quantité d'*alumine* entraînée par la coulée du métal.

II. — Silico-aluminures. Carbure et azotures d'aluminium.

Généralités. Modes de préparation. — Nous avons vu précédemment (v. *Alliages aluminium-silicium*, p. 236), qu'aucune combinaison définie d'aluminium et de silicium n'a encore été obtenue et qu'on regarde même les siliciures d'aluminium comme des composés impossibles à obtenir dans les conditions et par les méthodes actuelles d'expérimentation. Toutefois, à la faveur d'impuretés (oxydes généralement) ou par la présence de certains éléments, il peut se former des siliciures doubles renfermant à la fois l'aluminium et l'élément isolé au cours de la réaction en présence du silicium et de l'aluminium. On obtient ainsi des alliages ternaires désignés sous le nom générique de *silico-aluminures* qui indique leur origine. Ils peuvent être assez complexes, ainsi que nous le verrons dans la suite. On désigne du reste sous cette dénomination aussi bien les alliages dans lesquels il existe effectivement des siliciures doubles ou triples des différents constituants que ceux dans lesquels le silicium existe en tout ou en partie à l'état d'élément non combiné.

Ces alliages peuvent être obtenus principalement par les trois méthodes suivantes :

1° En fondant ensemble les trois éléments lorsque cela est possible, de façon à obtenir un lingot homogène;

2° En réduisant des silicates ou des mélanges de silice et d'oxydes par voie aluminothermique, de manière que le culot fondu renferme toujours un excès d'aluminium ;

3° En faisant réagir l'aluminium sur le fluorure double de silicium et de potassium additionné des métaux ou des oxydes, sulfures, etc., des métaux à introduire dans l'alliage à côté de l'aluminium et du silicium.

La plupart des alliages ainsi obtenus ont des propriétés générales qui permettent de les classer à côté des siliciures ; ils présentent comme eux l'éclat métallique, sont plus ou moins denses et, à l'état cristallisé, sont durs, cassants et à formes très nettes.

Alliages silicium-aluminium-magnésium. — Ils ont été préparés par M. Frilley au cours de recherches sur les alliages aluminium-silicium. Comme nous l'avons vu (p. 238), ces alliages, lorsqu'ils renferment plus de 4 °/₀ de magnésium, ne peuvent être travaillés ni à chaud ni à froid. Si on les additionne de 2 °/₀ seulement de silicium, on obtient un alliage qui, avec 9 °/₀ de magnésium, a une densité de 2,4 et possède des propriétés mécaniques remarquables. Ces dernières correspondent en effet aux chiffres ci-dessous :

		Résistance à la rupture.	Allongement.
Alliage en tôle	Écroui	47kg	2 °/₀
	Recuit	30	10
Alliage en fil	Écroui	52	2
	Recuit.......	28	12

Cet alliage peut être obtenu sans difficultés en partant d'un aluminium obtenu directement siliceux par voie électrolytique. Il est pratiquement irréalisable si l'on part d'un mélange fondu d'aluminium, de magnésium et de siliciure de magnésium : il devient alors cassant et ne peut plus être forgé ou laminé ni à chaud ni à froid (1).

(1) Cela semble indiquer que l'alliage obtenu par fusion n'a pas la même constitution moléculaire que celui correspondant à l'emploi d'un métal électrolytique : ce dernier doit sans doute contenir une combinaison définie, malgré ce qui a été dit plus haut, p. 238. — V. R. Frilley, Recherches sur quelques alliages siliciés (*Revue de Métallurgie*, juillet 1911, p. 525).

Alliages silicium-aluminium-calcium. — Ils sont surtout employés dans la métallurgie du fer. Comme leur prix est assez élevé, on les utilise pour la fabrication des aciers fins au petit four Martin, au four électrique ou au creuset. Ils renferment généralement de 50 à 55 % de silicium, 18 à 22 % de calcium, 4 à 5 % d'aluminium et 12 à 15 % de fer. Ils contiennent en outre 1 à 1,25 % de carbone, des traces de magnésium, de manganèse, de soufre et de phosphore.

Ces alliages remplissent le double rôle de désoxydant et de désulfurant. Le calcium étant introduit dans l'acier sous forme d'un alliage qui dégage beaucoup de chaleur, il réagit d'abord sur les oxydes et, lorsque ceux-ci sont réduits, il agit sur le sulfure de fer.

Dans les fours électriques, ces alliages sont ajoutés au moment de l'arrêt qui met fin à la période d'oxydation ; ils peuvent être introduits, soit directement dans les creusets, soit dans les poches de coulée, soit même dans les lingotières. Les laitiers formés par l'oxydation de ce silico-calcium-aluminium sont encore plus fluides que ceux résultant de l'emploi du silico-aluminium : ce sont des silicates doubles de calcium qui ont un point de fusion très bas. Les lingots obtenus sont toujours très sains.

Alliages silicium-aluminium-fer. — Ces alliages, plus ou moins purs, peuvent être préparés par des méthodes variées. C'est ainsi que Frilley les a obtenus par la réduction d'un silicate d'alumine : il a traité dans ce but, au four électrique, un mélange de kaolin et de charbon de bois. En variant les proportions du mélange, il a préparé des alliages ayant les compositions suivantes :

	N° 1	N° 2	N° 3
Silicium	62,92 %	47,30 %	74,40 %
Aluminium	23,10	34,10	9,81
Fer	14,26	17,24	15,18

Ces alliages, traités par l'acide chlorhydrique, laissent des résidus constitués presque uniquement par du silicium graphitique insoluble dans l'acide fluorhydrique ; rien ne laisse supposer qu'ils renferment un siliciure défini d'aluminium.

La bauxite, autre silicate d'alumine, permet d'obtenir ces alliages

avec facilité. Minet a pu ainsi obtenir des alliages renfermant 90 % d'aluminium, 9 % de fer et de 1 à 3 % de silicium, en la traitant directement au four électrique. Ces alliages sont malheureusement trop cassants, souvent même friables, pour pouvoir être utilisés dans les constructions mécaniques ; mais ils peuvent être employés avantageusement comme réducteurs dans les opérations métallurgiques.

Avec une bauxite ferrugineuse, peu siliceuse, on aura un *ferro-silicium* à basse teneur, à 15 pour 100 de silicium par exemple. Si l'on part au contraire d'une bauxite blanche siliceuse, on obtiendra un alliage riche en silicium ; mais en même temps une notable quantité d'alumine sera réduite, car il faudra marcher à allure plus chaude et l'on aura finalement un *ferro-silico-aluminium*, dans lequel la proportion d'aluminium dépassera parfois 50 pour 100.

Ces alliages ont le défaut de se désagréger au contact de l'air, ce qui diminue leur valeur marchande ; il est vraisemblable qu'il faut chercher l'origine du phénomène dans la présence de carbure d'aluminium.

Comme alliages mécaniques, M. Guillet a signalé ceux répondant aux compositions suivantes :

	N° 1	N° 2	N° 3
Aluminium	92 %	90 %	90 %
Silicium	6,75	9,25	10
Fer	1,25	0,75	Traces

Les meilleurs résultats de résistance sont obtenus avec les alliages dans lesquels la proportion de fer est très faible et celle du silicium voisine de 10 % (N° 2 et N° 3). Au delà de cette teneur, les alliages sont cristallins et ne peuvent guère être employés. Leur densité est voisine de celle de l'aluminium.

Dans la métallurgie du fer, et toujours dans le but de désoxyder le métal et d'avoir une scorie fluide, on emploie depuis quelques années l'alliage suivant :

Aluminium	12 à 15 %
Fer	43 à 42
Silicium	45 à 43

Ce ferro-silico-aluminium est ajouté à l'acier à des moments différents suivant les fabrications. A l'état de petits grains ou de petits morceaux, il se dissout immédiatement dans l'acier : la réaction qui a lieu entre les oxydes, le silicium et l'aluminium est très vive. On a comme résidu de la réaction des silicates de fer et d'aluminium dont la fluidité est très grande et qui entraînent avec eux les oxydes retenus dans le bain. Suivant l'état d'oxydation de celui-ci, on emploie de 3 à 5 kilogrammes de cet alliage par tonne de charge.

Pour la fabrication de l'acier au four Martin, au Bessemer ou au petit convertisseur, l'addition de ferro-silico-aluminium dans le four n'est pas à recommander, car elle pourrait occasionner des pertes importantes de matière. Il faut l'introduire dans la poche au moment de la coulée, à raison de 7 à 10 kilogrammes par tonne d'acier. La dépense est minime, cet alliage étant d'un très faible prix de vente.

Alliages silicium-aluminium-manganèse. — Ils sont très couramment employés aujourd'hui dans les grandes usines métallurgiques pour la fabrication de certains aciers durs et résistants tels que le métal à canons, pour les blindages et les projectiles. Ajoutés à l'acier, ils le désoxydent complètement ; il se forme un polysilicate de fer, manganèse, aluminium et silicium très fusible. Comme ce silicate prend naissance dans le métal lui-même, au fur et à mesure de la réaction, il entraîne avec lui les oxydes de fer, de chaux et la silice retenus dans le métal. La scorie formée, très fluide et très légère, monte rapidement à la surface du bain. Ces alliages sont utilisés aussi dans la fabrication de l'acier moulé, c'est-à-dire de l'acier coulé directement dans des formes de sable et qui doit être très dense pour que les pièces offrent de la sécurité au point de vue de leur résistance.

Un alliage de ce genre, préparé aux usines de Rochefort-sur-Mayenne, a donné à l'analyse la composition suivante :

Aluminium	20 %
Silicium	35
Manganèse	45
Carbone	0,2

Il peut être préparé de différentes façons, notamment par réduction des oxydes en présence de l'aluminium. Une méthode originale est celle qui utilise l'action du carborundum (siliciure de carbone) sur un mélange de bioxyde de manganèse et d'alumine. Elle peut se résumer par l'équation chimique ci-dessous :



$$5SiC + MnO^2 + Al^2O^3 = (Mn + 5Si + 2Al) + 5CO.$$

En utilisant pour cette préparation un mélange comprenant 200 parties de carborundum, 87 de bioxyde de manganèse et 102 d'alumine, on obtient un alliage renfermant 22 % de manganèse, 22 % d'aluminium et 56 % de silicium. Cet alliage, par sa composition, tient le milieu entre les silico-manganèses proprement dits et les silico-spiegels ou alliages fer-manganèse-silicium.

Généralement, les silico-mangano-aluminiums renferment une forte proportion de fer qui rend leur fabrication et leur manipulation plus faciles. Nous donnons ci-après la composition des deux principaux types de ces alliages employés dans la métallurgie de l'acier.

	Alliage riche.	Alliage pauvre.
Aluminium	9 à 12 %	4,5 à 6 %
Silicium	18 à 20	9 à 11
Manganèse	18 à 22	9 à 11
Fer	env. 40	env. 75

Certains métallurgistes préfèrent l'alliage riche parce qu'ils y voient l'avantage d'une réaction plus rapide. Dans ce cas, l'alliage est ajouté dans la poche de coulée ou dans les lingotières ou, tout à fait à la fin de la coulée, dans le four lui-même. Les usines qui ont des bains très chargés en laitiers emploient de préférence l'alliage pauvre parce que, introduit dans le four, il traverse facilement le laitier et arrive ainsi au métal sans perte. L'emploi de l'un ou l'autre alliage est donc une affaire d'expérience et d'appréciation.

Silico-aluminures complexes. — Outre les alliages qui précèdent, on prépare et on emploie industriellement de nombreux composés métallurgiques renfermant du silicium et de l'aluminium. Les plus connus sont ceux renfermant, ces deux éléments exceptés,

ALLIAGES CARBONE-ALUMINIUM

(Gross. : 50 diamètres.)

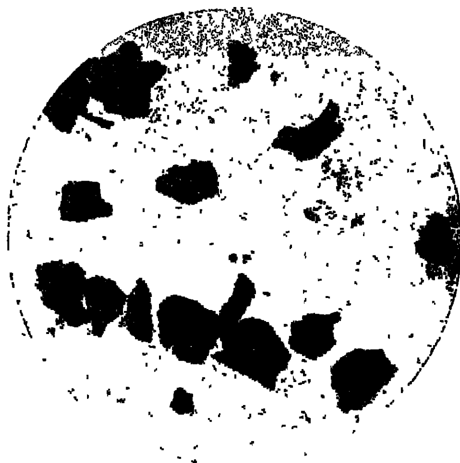


Fig. 78. — Alliage carbone-aluminium à 1.100°.



Fig. 79. — Cristaux de carbure d'aluminium C^3Al^4.

du vanadium, du chrome, du tungstène, du molybdène. Lorsqu'ils contiennent une certaine proportion de carbone, ils portent le nom de *carbo-silico-aluminures*.

Carbure d'aluminium. — Le carbone se comporte comme le silicium lorsqu'on le chauffe dans le vide en présence d'aluminium pur à une température voisine de 1.000 à 1.100°. Il n'y a pas carburation du métal et le résidu est formé d'une poudre grise renfermant des grains cristallins relativement brillants et à reflets irisés. Après les avoir séparés, on les traite par l'acide chlorhydrique ; par une ébullition prolongée, on obtient un résidu formé de petites lamelles, les unes noires et opaques, les autres plus claires et plus brillantes. Elles sont constituées par du carbone non cristallisé (*fig.* 78).

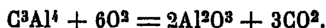
Cette expérience montre qu'à la température de 1.000 à 1.100°, on obtient non pas un carbure, mais un alliage, à grains cristallins, de carbone et d'aluminium. L'attaque de cet alliage par l'acide chlorhydrique dilué s'effectue de la même manière que celle des alliages aluminium-silicium, mais le résidu de carbone obtenu n'est pas cristallisé.

Il n'en est plus de même aux températures élevées telles que celles produites par l'arc électrique. En effet, Moissan a obtenu un *carbure d'aluminium* correspondant à la formule C^3Al^4 en unissant directement les deux éléments à la température du four électrique ; le charbon est placé dans un tube de même substance contenant une nacelle remplie d'aluminium, le tube étant traversé par un courant d'hydrogène. On casse, après refroidissement, la matière obtenue qui se présente sous forme d'une masse compacte dont la cassure montre de beaux cristaux (*fig.* 79) de teinte jaune mordoré et dont quelques-uns atteignent 5 à 6 millimètres de diamètre; leur densité est de 2,36 ; ils ont l'apparence hexagonale. On obtient ce même carbure en décomposant l'alumine par le carbure de calcium dans un four à arc ou, à 225° seulement, en chauffant l'aluminium avec du chlorure de carbone dans le tube fermé ; la réaction est très vive.

D'après les expériences effectuées, il semble qu'il y ait un point d'inversion dans la réaction entre le carbone et l'aluminium par

l'union pure et simple de ces deux éléments : à une certaine température, il y a formation de carbure d'aluminium, tandis qu'à une température plus basse, c'est-à-dire en chauffant ce carbure dans le vide à une température beaucoup plus basse (540°) que celle correspondant à l'union des composants (900°), il se résout en ses éléments. Le système carbure d'aluminium-aluminium-carbone en équilibre renferme à de fortes concentrations le carbure C^3Al^4 aux basses températures et C et Al aux températures élevées. La quantité de carbure obtenu paraît être maximum quand on chauffe à une température élevée et qu'on coule ensuite rapidement.

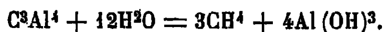
Chauffé à l'air, le carburé d'aluminium se décompose suivant la formule :



$$C^3Al^4 + 6O^2 = 2Al^2O^3 + 3CO^2.$$

Cette décomposition à l'air n'a pas une allure régulière en fonction de la durée de la température; la rapidité de la réaction dépend de la facilité avec laquelle l'oxygène de l'air a accès auprès des constituants.

Le carbure d'aluminium présente un certain intérêt industriel, car, au contact de l'eau, il se décompose en méthane et alumine hydratée. On a en effet :



$$C^3Al^4 + 12H^2O = 3CH^4 + 4Al\,(OH)^3.$$

Les deux produits de la réaction sont utilisés aujourd'hui dans l'industrie chimique.

Azotures d'aluminium. — Ces composés, dont l'intérêt industriel va croissant depuis quelques années, s'obtiennent de différentes façons. Dans plusieurs procédés, on a cherché à les préparer en faisant agir directement l'azote sur l'aluminium métallique. Mais, industriellement, l'azoture commercial est obtenu par l'utilisation de l'alumine, et même de la bauxite (v. p. 3), mélangée à du charbon et chauffée à haute température (au moins à 1.500° C.) dans un courant d'azote; dans ce dernier procédé, il se formerait d'abord du carbure d'aluminium dont le carbone serait ensuite déplacé par l'azote au cours même de sa formation.

On peut aussi expliquer la réaction de la manière suivante : le

carbone s'empare de l'oxygène de l'alumine, tandis que l'azote, se fixant sur l'aluminium mis en liberté, donne de l'azoture d'aluminium. Ce produit, préparé à partir de l'alumine pure, forme des masses cristallines, à cristaux groupés et enchevêtrés, de couleur blanche, grise ou bleue; il titre en moyenne 30 pour 100 d'azote, la teneur théorique étant 34 pour 100.

Relativement à son importance industrielle, l'azoture d'aluminium est surtout intéressant par la propriété qu'il possède de dégager de l'ammoniaque au contact de l'eau. Les solutions alcalines bouillantes le décomposent complètement, de sorte qu'il peut être avantageusement utilisé comme générateur d'ammoniaque et comme engrais. Appliqué directement au sol, sa décomposition est très avantageuse comme agent fertilisant. Quant à la préparation simultanée de l'ammoniaque et de l'alumine, elle s'effectue d'après la formule suivante :



$$2AzAl + 3H^2O = 2AzH^3 + Al^2O^3.$$

L'alumine peut rentrer en fabrication pour être transformée à nouveau en azoture ou être employée à la fabrication de l'aluminium.

Le procédé Serpek comporte l'emploi d'un four électrique rotatif, où un mélange de *bauxite* et de *charbon* est chauffé dans un courant d'*azote*. Le produit qui sort du four est de l'azoture à 17-22 pour 100 d'azote. Quant aux impuretés de la bauxite, elles ont été partiellement volatilisées, comme le silicium, ou bien elles ont passé à l'état d'alliage complexe disséminé dans la masse.

Cet azoture d'aluminium impur est alors substitué, comme matière première, à la bauxite dans les ateliers de fabrication d'alumine pure travaillant par le procédé Bayer. Mais, au lieu de fournir seulement de l'alumine, ainsi que le fait la bauxite, il donne en même temps du gaz ammoniac que l'on fixe à l'état de sulfate.

La valeur marchande de ce sel ammoniacal vient donc en déduction importante du prix de revient de l'alumine et, comme l'abaissement du prix de revient de l'aluminium dépend surtout aujourd'hui de la diminution du prix de l'alumine, le procédé Serpek se trouve avoir une grande importance pour les fabricants d'aluminium.

III. — Alliages divers.

Alliages pour paliers et coussinets. — Il existe plusieurs alliages renfermant de l'aluminium et destinés à la fabrication des pièces devant supporter des frottements continuels, comme les paliers et les coussinets de machines. Un de ces alliages présente la composition suivante :

Aluminium	35 %
Antimoine	14
Étain	12
Zinc	37
Cuivre	1,21
Plomb	0,80

Les proportions des différents éléments peuvent varier dans d'assez grandes limites selon l'emploi immédiat auquel l'alliage est destiné. L'important est qu'avec les métaux ci-dessus on obtienne un métal doux, en rapport avec son utilisation et, d'autre part, pouvant résister à l'usure par le frottement. De là la présence de l'étain, du plomb et de l'antimoine que l'on rencontre dans la plupart des antifrictions.

Pour préparer cet alliage, on fait d'abord fondre le cuivre, puis on ajoute successivement les autres métaux. A chaque addition d'un nouveau métal, on abrasse énergiquement le mélange avec une tige de charbon ou de fer et on baisse légèrement la température. L'alliage obtenu dans ces conditions possède après solidification un grain très serré qui lui communique une résistance supérieure à celle de la plupart des bronzes réservés à cet usage.

Un autre alliage, destiné à la même application et dû à l'Américain Block, présente la composition suivante :

Aluminium	4 %
Nickel	4
Fer	38
Plomb	6
Cuivre	48

Le fer est d'abord fondu, puis on ajoute le nickel et l'on continue à chauffer jusqu'à ce que les deux métaux soient intimement mélangés.

D'après l'inventeur, le nickel, dans cet alliage, exercerait une action lubrifiante ; le rôle du plomb serait de lui donner de la plasticité et de la ductilité.

Alliages pour soudures. — La plupart des alliages et produits commerciaux dits « composés spéciaux » employés pour la soudure de l'aluminium résistent mal aux actions chimiques et électrolytiques en rapport avec les emplois de ce métal et, ainsi, se désagrègent plus ou moins vite. De là l'emploi presque général de la soudure autogène. Il existe cependant quelques alliages qui donnent de bons résultats. C'est le cas du suivant :

Aluminium	0,75	partie
Manganèse	0,1	—
Étain	30	—
Zinc	7	—

Son poids de fusion est assez bas, de sorte que les surfaces de métal à souder n'ont pas besoin d'être portées à une température élevée pour être réunies.

Les *alliages au cadmium* ont également été proposés pour cet emploi, notamment le suivant :

Aluminium	2 %
Cuivre	10
Cadmium	3
Zinc	25
Étain	60

Mentionnons également les *alliages au bismuth et à l'étain :*

	N° 1	N° 2
	—	—
Aluminium	1 %	5 %
Étain	99	90
Bismuth	1	5

L'alliage ci-après s'emploie au fer à souder ou au chalumeau.

On le prépare en alliant les trois métaux suivants :

Aluminium pur....................	10 grammes
Étain..........................	180 —
Zinc...........................	80 —

On jette l'étain en morceaux dans l'aluminium fondu et le zinc en dernier. On coule ensuite en lingotières ou en baguettes.

Citons enfin l'alliage suivant :

Aluminium..............................	79 %
Magnésium..............................	11
Cuivre à 0,5 % de phosphore...............	10

Il est beaucoup plus dur que l'aluminium, quoique sa densité n'en diffère guère. On l'emploie surtout pour la réparation des carters en laiton d'aluminium.

Alliages blancs. — Ces alliages, qui ont de nombreux emplois, notamment dans l'orfèvrerie, l'ornementation, l'industrie alimentaire, ont une constitution très variable. Celui que l'on désigne communément sous le nom de *bronze d'argent*, pour rappeler sa couleur, présente la composition suivante :

Aluminium..........................	1,2 partie
Manganèse..........................	18 —
Silicium...........................	5 —
Cuivre.............................	67,5 —
Zinc...............................	13 —

On emploie également le suivant, dont la coloration est blanc argentin et la densité voisine de 2,7 :

Aluminium..............................	99 %
Cuivre.................................	0,6
Fer....................................	0,3
Zinc...................................	0,1
Magnésium..............................	0,04

Cet alliage est très malléable, ductile, tenace. On peut le tourner, le marteler et le souder aisément. Il résiste très bien à l'air marin et aux acides organiques végétaux.

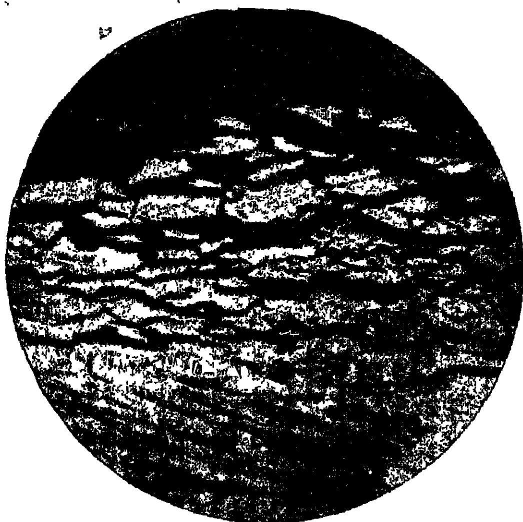


Fig. 80. — Tôle de partinium désagrégée superficiellement par exfoliation progressive. — Gross. : 100 diam.



Fig. 81. — Tôle de partinium fondue. — Gross. : 45 diam.

La résistance à la traction est de 30 kilogrammes par millimètre carré. On l'emploie surtout pour faire des timbales et des couverts.

Pour la fabrication des feuilles minces, on emploie l'alliage suivant, qui est très doux :

Aluminium	94 %
Cuivre	0,2
Magnésium	1,6
Plomb	0,7
Étain	3,2
Fer	0,3

La résistance à la rupture de cet alliage est très élevée, ce qui justifie son emploi.

Alliages durs. — *Partinium.* — Outre les alliages précédemment indiqués et contenant du nickel, du chrome ou du tungstène, il faut citer certains alliages complexes ayant des applications spéciales. Le plus anciennement connu est le *partinium* (du nom de Partin, son inventeur) formé de cuivre, d'antimoine, d'étain, de tungstène et d'aluminium. Souvent on ajoute à ces métaux quelques centièmes de magnésium et de nickel.

Cet alliage présente des particularités intéressantes : sa résistance à la rupture atteint 60 kilogrammes par millimètre carré; il est très dur et cependant très léger. On l'emploie principalement pour la fabrication des cônes de friction et caissons d'automobiles, tubes de machines, enveloppes de moteurs. On lui a réservé également, à une certaine époque, quelques applications militaires, notamment la fabrication des cuirasses et des casques.

On en fabrique enfin des *filaments* pour lampes électriques. Dans le procédé Ruhstrat, 4 à 8 parties d'acide tungstique TuO^3 sont additionnées de 1 partie d'aluminium. A l'aide d'un agglutinant on en forme une pâte qu'on étire en fils de 4 millimètres de diamètre. Ceux-ci sont séchés et calcinés dans une atmosphère inerte, puis le produit obtenu est pulvérisé; on en fait une seconde pâte qu'on étire une dernière fois à la filière.

Lorsqu'il renferme un pourcentage élevé d'antimoine et de tungstène, il devient assez facilement altérable au contact de l'air humide et en même temps fragile. Cette désagrégation lente est

accélérée par l'écrouissage, qui, en créant des tensions internes, facilite l'exfoliation de la surface de l'alliage. La figure 80 montre, d'après M. Amédéo, une tôle de partinium présentant ce défaut : elle est désagrégée superficiellement par suite de la dislocation progressive des cellules. Comme on le voit, la destruction de l'alliage se fait par bandes successives, ces dernières étant parallèles au sens du laminage, ce qui met bien en évidence le rôle des tensions d'écrouissage dans l'altération de l'alliage.

Le partinium se soude et se répare généralement par soudure autogène avec fil d'apport en aluminium. Il a une structure très fine et très homogène ; la plupart des éléments qui entrent dans sa fabrication étant solubles dans l'aluminium, les inclusions fragiles sont peu nombreuses (*fig.* 81) ; les soudures effectuées sur cet alliage présentent ainsi une grande résistance ; elles n'ont pas la fragilité de celles de nombreux alliages où l'emploi d'un métal d'apport amène une diminution locale de ténacité.

Alliage Baxeres. — Il consiste en un mélange d'aluminium, antimoine, nickel ou chrome, et possède également une grande dureté. On sait du reste que l'antimoine durcit l'aluminium. D'après l'inventeur, si on l'incorpore dans ce métal sous forme d'antimoniure de nickel ou de chrome, on rend l'alliage fibreux et par conséquent malléable et ductile.

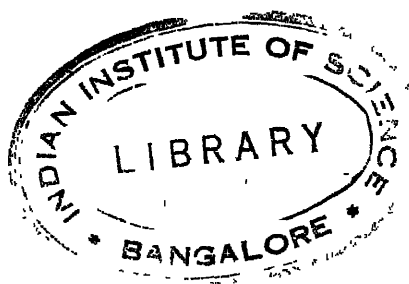
L'antimoniure de chrome s'obtient en faisant dissoudre dans de l'antimoine en fusion des baguettes de nickel. L'antimoniure de chrome se prépare en faisant fondre un mélange d'antimoine et de fer chromé à 80 $^0/_0$; le chrome se dissout, de préférence au fer. On ajoute ces antimoniures à l'aluminium dans la proportion de 1,5 à 3 $^0/_0$, ce qui facilite l'incorporation dans ce métal des éléments, nickel ou chrome, difficiles à mélanger et à unir directement par fusion avec l'aluminium.

Autres alliages. — Citons encore l'alliage suivant, breveté par Pigeonneau :

Aluminium	90 parties
Nickel	4 —
Fer	1 ou 2 —

Il possède également une très grande dureté, et se laisse cependant laminer et marteler avec facilité ; il est malléable et inoxydable. Il fond à 1.080°.

Ajoutons, pour terminer, que M. Richards cite comme le plus dur des alliages légers d'aluminium, un alliage quadruple d'aluminium cuivre, nickel et manganèse. On l'emploie, grâce à cette propriété, pour la fabrication des cônes de friction et de nombreux organes de machines.



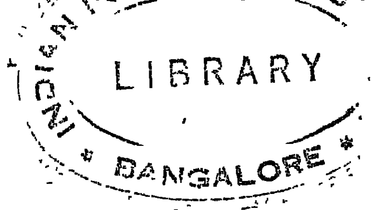


TABLE DES MATIÈRES

CHAPITRE II

PROPRIÉTÉS DE L'ALUMINIUM

I. — Propriétés physiques et mécaniques.

II. — Soudure de l'aluminium.

III. — Propriétés chimiques.

IV. — Influence des traitements sur les propriétés de l'aluminium au point de vue de ses emplois.

CHAPITRE III

APPLICATIONS INDUSTRIELLES DE L'ALUMINIUM

I. — Applications métallurgiques.

II. — Applications dans l'industrie électrique.

III. — Applications dans l'industrie mécanique.

IV. — Papier et poudre d'aluminium.

V. — Applications diverses.

VI. — Emploi de l'aluminium recouvert de dépôts métalliques ou recouvrant d'autres substances.

CHAPITRE IV

BRONZES D'ALUMINIUM

CHAPITRE V

BRONZES, LAITONS ET MAILLECHORTS A L'ALUMINIUM

I. — Bronzes à l'aluminium.

II. — Laitons à l'aluminium.

III. — Maillechorts à l'aluminium

CHAPITRE VI

ALLIAGES DE L'ALUMINIUM AVEC LES METAUX USUELS

I. — Alliages d'aluminium et de zinc.

II. — Alliages d'aluminium et de magnésium.

III. — Alliages binaires de l'aluminium avec l'étain, le plomb, le bismuth, l'antimoine et le nickel.

CHAPITRE VII

ALLIAGES DE L'ALUMINIUM AVEC LES MÉTAUX RARES OU SPÉCIAUX

CHAPITRE VIII

ALLIAGES DIVERS D'ALUMINIUM

I. — Alliages d'aluminium et de silicium

II. — Silico-aluminures. — Carbure et azotures d'aluminium.

III. — Alliages complexes divers.



TOURS, IMP. DESLIS FRÈRES ET Cie, 6, RUE GAMBETTA.